

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.03.03 (141100.62) «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Бензиновый двигатель с непосредственным впрыском топлива
для автомобиля ВАЗ

Студент(ка)

Д.Ю. Давыдов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

М.И. Фесина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Нормоконтроль

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите
Зав. кафедрой «ЭМСУ»

к.т.н., Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» _____

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____

2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение бакалаврской работы

Студент Давыдов Даниил Юрьевич

1. Тема работы Бензиновый двигатель с непосредственным впрыском топлива для автомобиля ВАЗ

2. Срок сдачи студентом законченной работы 16-22 июня 2016 года, согласно утвержденному графику защиты ВКР на 2015-2016 уч. год.

3. Исходные данные к работе Двигатель на базе ВАЗ-2112, с $V_h=1,5$ л., $\varepsilon = 10,5$, для скоростных режимов работы - $n_{\min}=900$ мин⁻¹, $n = 2000$ мин⁻¹, $n_M=3500$ мин⁻¹, $n_N=5000$ мин⁻¹, $n_{\max}=5600$ мин⁻¹.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) _____

Введение;

Обзор применяемых технологий непосредственного впрыска топлива в цилиндр;

Тепловой расчет двигателя;

Расчет кинематики двигателя;

Расчет динамики двигателя;

Специальная часть

Безопасность и экологичность проекта

Расчет основных деталей двигателя;

Расчет механизмов и систем двигателя;

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала
Продольный и поперечный разрез двигателя - 2 листа формата А1

ВСХ - 1 лист формата А1

Диаграммы теплового расчета - 1 лист формата А1

Диаграмма кинематического и динамического расчетов - 2 листа формата А1

Конструкторский чертеж детали - 1 лист формата А1;

Сборочный чертеж форсунки - 1 лист формата А1;

6. Консультант по нормоконтролю – д.т.н., профессор Егоров А.Г.

По разделу "Безопасность и экологичность работы"

к.т.н., профессор Фесина М.И.

7. Дата выдачи задания « ____ » _____ 2016 г.

Руководитель бакалаврской работы _____

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____

(подпись)

Д.Ю. Давыдов

(И.О. Фамилия)

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
 «Тольяттинский государственный университет»
Институт энергетики и электротехники
Энергетические машины и системы управления

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» _____ Д.А. Павлов
 (подпись) (И.О. Фамилия)
 « ____ » _____ 2016 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы

Студента Давыдов Даниил Юрьевич
 по теме Бензиновый двигатель с непосредственным впрыском топлива
 для автомобиля ВАЗ

№ этапов работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объем выполнения, %	Фактический объем выполнения, %	Отметка о выполнении
1	Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	30 апреля 2016 г.	90%		
2	Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет основных деталей двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Расчет механизмов и систем двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	15 мая 2016 г.	90%		
5	Описание конструкции спроектированной установки	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
6	Безопасность и экологичность работы	Раздел записки	10 июня 2016 г.	90%		
7	Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты	Сброшюрованная записка и подписанные чертежи	10 июня 2016 г.	100%		

Студент _____ Д.Ю. Давыдов
 (подпись) (И.О. Фамилия)
 Руководитель _____ В.В. Смоленский
 (подпись) (И.О. Фамилия)
 « ____ » _____ 2016 г.

АННОТАЦИЯ

Настоящая бакалаврская работа состоит из шести частей. В первой части работы представлен обзор применяемых технологий непосредственного впрыска топлива в цилиндр, во второй части проведен тепловой расчет двигателя, в третьей кинематический, в четвертой динамический расчет, в пятой дано описание конструкции двигателя спроектированного двигателя, проведен анализ его эффективности и токсичности, в шестой дана оценка безопасности и экологичности результатов проектирования, в приложении приведены результаты теплового, кинематического и динамического расчета, а также прочностной расчет основных деталей двигателя,

Пояснительная записка к бакалаврской работе состоит из 117 стр.

Графическая часть работы содержит 8 листов формата А1. Продольный и поперечный разрез двигателя и чертеж форсунки, лист описание конструкции исследуемых двигателей, три листа диаграмм, чертеж поршня.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
1 Обзор применяемых технологий непосредственного впрыска топлива в цилиндр.....	11
2 Тепловой расчет двигателя.....	14
2.1 Топливо.....	14
2.2 Параметры рабочего тела.....	14
2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы.....	15
2.4 Расчет процесса впуска.....	16
2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси.....	17
2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания.....	19
2.7 Расчет процессов расширения и выпуска.....	21
2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла.....	23
2.9 Расчет эффективных показатели двигателя.....	24
2.10 Тепловой баланс двигателя.....	25
3 Расчет кинематики двигателя	28
4 Динамический расчет двигателя.....	29
4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма	29
4.2 Силы инерции	30
4.3 Суммарные силы	30
4.4 Крутящие моменты	31
4.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала..	32
4.6 Силы, действующие на колено вала	32
4.7 Силы, действующие на коренные шейки	33
4.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя.....	34
5 Специальная часть.....	35

5.1 Расчет электромагнитной форсунки.....	35
5.2 Оценка влияния эффективности непосредственного впрыска	39
6 Безопасность и экологичность проекта.....	42
6.1 Нормы по ограничению токсичности отработавших газов ДВС...	42
6.2 Нормы по ограничению шума автотранспортных ДВС.....	43
6.3 Сравнение токсичности отработавших газов и шуму проектируе- мого ДВС с принятыми нормами.....	44
6.3.1 Сравнение токсичности отработавших газов проектируемого ДВС с принятыми нормами.....	44
6.3.2 Сравнение шумности проектируемого ДВС с принятыми нор- мами.....	45
6.4 Основные преимущества двигателей типа GDI.....	45
6.5 Прямой впрыск и расслоение заряда на проектируемом двигате- ле.....	46
6.6 Оценка влияния расслоения заряда на снижение токсичности ОГ.....	47
6.7 Выводы по разделу.....	48
Заключение	49
Список использованных источников.....	50
Приложение А - Результаты теплового расчета.....	53
Приложение Б - Результаты кинематического расчета.....	64
Приложение В - Результаты динамического расчета.....	66
Приложение Г - Результаты расчетов сил действующих в КШМ.....	72
Приложение Д – Расчет основных деталей двигателя	82
Д.1 Расчет поршневой группы.....	82
Д.1.1 Расчет поршня.....	82
Д.1.2 Расчет поршневого кольца.....	84
Д.1.3 Расчет поршневого пальца.....	86
Д.2 Расчет шатунной группы.....	88
Д.2.1 Расчет поршневой головки шатуна.....	88

Д.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна.....	94
Д.2.3 Расчет стержня шатуна.....	95
Д.2.4 Расчет шатунных болтов.....	97
Д.3 Расчет коленчатого вала.....	99
Д.3.1 Удельное давление на поверхности шеек.....	99
Д.3.2 Расчет коренной шейки.....	100
Д.3.3 Расчет шатунной шейки.....	101
Д.3.4 Расчет щеки.....	104
Д.4 Расчет механизма газораспределения двигателя.....	106
Д.4.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане.....	106
Д.4.2 Определение перемещения клапана.....	107
Д.4.3 Определение время-сечения клапана газодинамическим методом.....	110
Д.4.4 Расчет пружины клапана.....	111
Д.4.5 Расчет распределительного вала.....	114
Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа.....	116

ВВЕДЕНИЕ

Технология прямого впрыска

Прямой впрыск топлива (gasoline direct injection) (рисунок 1.1) получает все большую популярность среди производителей двигателей, поскольку позволяет значительно увеличить эффективность топлива по сравнению со стандартным типом впрыска без необходимости внесения серьезных изменений в самой конструкции двигателя. Технология GDI определенно является следующим шагом в эволюции систем впрыска бензиновых двигателей. Каждый из этих шагов в процессе естественной эволюции от механического карбюратора к впрыску топлива с помощью дроссельной заслонки через многоточечный и секвентальный многоточечный впрыск топлива, вбирал в себя все достижения в области инжекторов и технологии электронного контроля процессом впрыска и сгорания в двигателе. Дальнейшее развитие этих технологий, а также постоянный процесс эволюции камеры сгорания и дизайна впускных клапанов, а также в динамики сгорания создали предпосылки к возникновению и производству автомобильных двигателей с GDI Mitsubishi, Toyota, Nissan, VAG и GM производят четырехклапанные двигатели типа GDI для любого вида транспорта не только в Японии, но и в других странах мира.



Рисунок 1.1 - Прямой впрыск топлива

водят четырехклапанные двигатели типа GDI для любого вида транспорта не только в Японии, но и в других странах мира.

Основные Преимущества двигателей типа GDI

- Ультра низкое потребление топлива даже по сравнению с дизельными двигателями.
- Большая мощность по сравнению с традиционными MPI двигателями.

Залогом успешного внедрения технологии GDI

послужила разработка нового типа инжектора, который позволил увеличить давление впрыска, гарантировать стабильный и точный поток топлива, а также возможность контроля подачи воздуха. Это позволило добиться стабильности прямого впрыска. В настоящее время технология GDI расширяется за пределами Японии и это связано с дальнейшим ужесточением стандартов выхлопа вредных газов в атмосферу. Давайте теперь разберем эффективность технологии GDI (рисунок 1.2) и вопросы выхлопных газов, которые стояли до возникновения, а также определим причины, почему такая технология зародилась.

Все двигатели внутреннего сгорания воспламеняют топливо в воздухе, и каждый тип топлива имеет идеальное соотношение смеси, при котором топливо сгорит полностью или максимально полно. Во всем мире инженеры, создающие двигатели, ломают голову над тем, чтобы достигнуть идеального соотношения воздуха и топлива для полного сгорания смеси. Как правило, это так называемое стехиометрическое соотношение. У бензина оно равно 14,7:1 (14,7 частей воздуха и 1 часть топлива по весу). Это соотношение должно поддерживаться на разных нагрузках двигателя и при разных условиях. Раньше такое соотношение иногда достигалось в карбюраторе. Однако карбюратор имел свой верхний предел развития, несмотря на экономичность и достаточную мощность, однако новые модели требовали еще большей мощности с одновременным ужесточением выхлопа.

1 Обзор применяемых технологий непосредственного впрыска топлива в цилиндр

Чем беднее смесь, тем более экономичным становится двигатель. Однако существуют две причины, по которым не все двигатели могут работать на обедненном топливе:

- Если смесь очень бедная, двигатель не может поддерживать правильного сгорания.
- Меньшая концентрация топлива приводит к меньшей мощности.

В двигателях типа Lean Burn (бедная смесь) удастся избежать этих проблем путем использования высокоэффективного процесса смешивания. Например, используются специальные поршни с фигурной верхней площадкой, впускные коллекторы, которые направлены прямо на поршни, чтобы входящий воздух создавал завихрения внутри камеры сгорания. Это позволяет лучше перемешивать воздух и топливо, сокращать выбросы вредных частичек, которые не сгорают полностью. Иными словами, сгорание происходит более комплексно и позволяет не только сократить вредный выхлоп, но и сэкономить топливо, сокращая его долю в смеси с 1 к 14 до 1 к 25 без воздействия на мощность двигателя.

В наши дни технология Lean Burn трансформировалась в технологию прямого впрыска и выразилась в широком производстве двигателей типа DI от Mitsubishi, Toyota, Volkswagen и другие производители.

Прямой впрыск BMW Di

Он основан на использовании резервуара давления и рампы, где давление регулируется до 120 бар. По причине использования высокого давления, топливо может впрыскиваться непосредственно в камеру сгорания через электромагнитные инжектора. Подача воздуха в двигатель регулируется электронным дросселем и измеряется с помощью измерителя массы воздуха. Для контроля

смеси используется широкополосный кислородный датчик, который измеряет Лямбда между 0,8 и бесконечностью.

В системах Di-Motronic используется три рабочих режима

1. Многослойный впрыск, где Лямбда больше 1 (смесь воздуха и топлива больше чем 14,7:1)
2. Однородный впрыск, где лямбда 1 (смесь воздуха и топлива равно 14,7:1)
3. Обогащенный однородный впрыск, где Лямбда равна 0,8 (т.е. отношение воздуха к топливу 11,8:1)

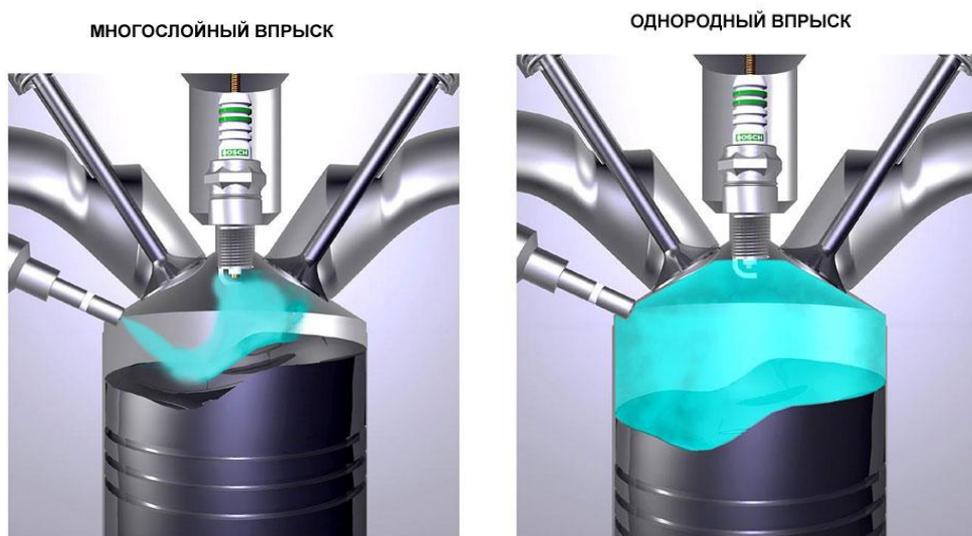


Рисунок 1.7 - Многослойный и однородный прямой впрыск у BMW

Поскольку в двигателях с прямым впрыском используется концепция частичной нагрузки и работы на обедненной смеси, достигается меньший расход топлива. Впрыск топлива происходит непосредственно перед воспламенением в область рядом со свечой зажигания в изолированную область. Это поднимает термодинамическую эффективность, поскольку температура не уйдет через стенки цилиндра. Двигатель может работать с полностью открытым дросселем, что позволяет избежать другие потери. В работе многослойного впрыска уровень Лямбда находится в пределах 1,5 и 3, отношение воздуха к топливу 22:1 и 44:1. По сравнению с традиционным впрыском, экономится на 40% больше топлива при работе на холостых оборотах. По мере увеличения нагрузки на двигатель, увеличивается уровень впрыска, многослойное облако становится

более обогащенным и ухудшается показатель выброса. Как и в дизельном двигателе образуется нагар. Чтобы предотвратить его появление, система DiMotronic начинает работать в однородном режиме. При этом используется более ранний впрыск и достигается уровень воздуха к топливу 14,7:1 и лямбда 1.

При работе на низких нагрузках, уровень NO_x нельзя сократить значительно, используя стандартный катализатор. Его выброс в атмосферу можно сократить значительно (на 70%), используя рециркуляцию перед тем, как газ попадет в катализатор. Но и этого мало, поэтому BMW использовали специальный аккумулятор в выхлопной системе, чтобы собирать окисел азота в форме нитратов (HNO_3) на своей поверхности. Однако, его возможность лимитированы размером аккумулятора. Поэтому он должен время от времени регенерироваться. Поэтому система Motronic переходит в третий режим работы время от времени работа на обогащенной смеси с однородным впрыском и лямбда, равной 0,8 и отношением воздуха к топливу как 12:1. Нитраты и CO превращаются в азот и кислород. При этом Система Управления Двигателем должна принимать решение по изменению режима работы двигателя в течение менее одной секунды и так, чтобы это не было заметно водителю.

2 Тепловой расчет двигателя

Произведем расчет четырехтактного двигателя с впрыском, предназначенного для легкового автомобиля по методике Вибе. [16]

Исходные данные для теплового расчета: $V_L = 1.5$ л; $n_N = 5600$ мин⁻¹; $i = 4$; $\tau = 4$; $\varepsilon = 10,5$, для скоростных режимов работы - $n_{\min} = 900$ мин⁻¹, $n = 2000$ мин⁻¹, $n_M = 3500$ мин⁻¹, $n_N = 5000$ мин⁻¹, $n_{\max} = 5600$ мин⁻¹.

2.1 Топливо

Средний элементарный состав и молекулярная масса топлива: $C = 0,855$; $H = 0,145$ и $m_T = 115$ кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания топлива:

$$H_u = 33,91C + 125,6H - 10,89(O - S) - 2,51 \cdot (9H + W); \text{ кДж/кг} \quad (2.1)$$

$$H_u = 33,91 \cdot 0,855 + 125,6 \cdot 0,145 - 2,51 \cdot 9 \cdot 0,145 = 43930 \text{ кДж/кг.}$$

2.2 Параметры рабочего тела

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} \right) = 0,516 \text{ кмоль возд/кг топл;} \quad (2.2)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,855 + 8 \cdot 0,145 \right) = 14,957 \text{ кг возд/кг топл.} \quad (2.3)$$

Примем $\alpha = 1$ на всех режимах, как для базового так и для спроектированного двигателя.

Далее проводятся расчетные формулы, а результаты расчета для всех режимов приводятся в виде таблиц.

Количество горючей смеси:

$$M_1 = \alpha L_0 + l/m_T; \text{ кмоль гор. см/кг топл.} \quad (2.4)$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при $K = 0,5$:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл}; \quad (2.5)$$

$$M_{CO} = 2 \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль } CO/\text{кг топл}; \quad (2.6)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - 2K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл}; \quad (2.7)$$

$$M_{H_2} = 2K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль } H_2/\text{кг топл}; \quad (2.8)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0 ; \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл}. \quad (2.9)$$

Общее количество продуктов сгорания:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2} ; \text{ кмоль пр.сг./кг топл}. \quad (2.10)$$

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

$$\mu_0 = M_2 / M_1 \quad (2.11)$$

Результаты расчета параметров рабочего тела приведены в таблице 2.1, так как состав смеси одинаковый то параметры рабочего тела для всех режимах одинаковые поэтому приведен один режим.

Таблица 2.1 - Параметры рабочего тела

$n, \text{ мин}^{-1}$	α	$M_1, \text{ кмоль гор.см./кг топл.}$	$M_{CO_2}, \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл.}$	$M_{CO}, \text{ кмоль } CO/\text{кг топл.}$	$M_{H_2O}, \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл.}$	$M_{H_2}, \text{ кмоль } H_2/\text{кг топл.}$	$M_{N_2}, \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл.}$	$M_2, \text{ кмоль пр.сг./кг топл.}$	μ_0
900	1	0,525523	0,07125	0	0,0725	0	0,409327	0,553077	1,052432

2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Атмосферные условия: $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ и $T_0 = 293 \text{ К}$.

Давление остаточных газов:

$$p_r = p_k(1,035 + A_p \cdot 10^{-8} n^2), \quad (2.12)$$

где $p_{rN} = 1,18p_0 = 1,18 \cdot 0,1 = 0,118$ МПа; $A_p = (p_{rN} - p_0 \cdot 1,035) 10^8 / (n_N^2 p_0)$.

Результаты расчета параметров окружающей среды и остаточных газов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры окружающей среды и остаточных газов

n, мин ⁻¹	ρ _к , кг/м ³	T _к , К	ρ _к , Мпа	T _г , К	p _г , Мпа
900	1,189	293	0,1	1160	0,103875
2000	1,189	293	0,1	1170	0,105349
3500	1,189	293	0,1	1195	0,109164
5000	1,189	293	0,1	1235	0,115059
5600	1,189	293	0,1	1300	0,118
Двигатель ВА3-2112					
900	1,189	293	0,1	1080	0,109
2600	1,189	293	0,1	1161	0,112
3700	1,189	293	0,1	1245	0,114
5000	1,189	293	0,1	1265	0,116
5600	1,189	293	0,1	1305	0,118

2.4 Расчет процесса впуска

Принимается $\Delta T_N = 10^\circ\text{C}$, тогда, $A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125n_N)$, следовательно ΔT :

$$\Delta T = A_T(110 - 0,0125n). \quad (2.13)$$

Плотность заряда на впуске: $\rho_k = p_k \cdot 10^6 / (R_B T_k)$; кг/м³.

Потери давления на впуске.

$$\Delta p_a = \left(\beta^2 + \xi_{ВП} \right) A_n^2 n^2 \rho_k \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа}. \quad (2.14)$$

Давление в конце впуска:

$$p_a = p_k - \Delta p_a; \text{ МПа}. \quad (2.15)$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_k + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} p_a - \varphi_{оч} p_r}, \quad (2.16)$$

где $\varphi_{оч}$ – коэффициент очистки; $\varphi_{доз}$ – коэффициент дозарядки.

Температура в конце впуска:

$$T_a = (T_k + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r); \text{ К.} \quad (2.17)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_k}{T_k - \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_k} \left(\varphi_{доз} \cdot \varepsilon \cdot p_a - \varphi_{оч} \cdot p_r \right) \quad (2.18)$$

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

$$V_a = 8.314 \cdot 10^{-3} \left[\left(\alpha \cdot \frac{l_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_m} \right) T_a \right] / \left[\kappa + \alpha \cdot l_0 \cdot \bar{p}_a \right] \quad (\text{м}^3), \quad (2.19)$$

Результаты расчета процесса впуска приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Расчет процесса впуска

n, мин ⁻¹	ΔT, °C	Δp _a , Мпа	p _a , Мпа	φ _{оч}	φ _{доз}	γ _r	T _a , К	η _v	V _a , К
900	24,6875	0,006783	0,093217	0,99	0,9	0,036197	347,1114	0,755371	1,0209
2000	21,25	0,010275	0,089725	0,94	0,96	0,033024	341,6072	0,790464	1,04618
3500	16,5625	0,013004	0,086996	0,88	1,02	0,029779	335,1675	0,832584	1,058665
5000	11,875	0,0176995	0,0823	0,84	0,97	0,032173	333,8676	0,750205	1,114729
5600	10	0,019425	0,080575	0,8	0,95	0,031019	332,9951	0,722023	1,133133
Двигатель ВАЗ-2112									
900	19,75	0,005779	0,094221	1	0,85	0,043126	344,4703	0,721787	1,000492
2600	15,5	0,010275	0,089725	0,94	0,93	0,036289	338,3532	0,770691	1,033941
3700	12,75	0,013588	0,086412	0,98	1	0,033797	336,4559	0,804532	1,067569
5000	9,5	0,016054	0,083946	0,81	0,95	0,029931	330,4714	0,758778	1,079382
5600	8	0,019425	0,080575	0,77	0,94	0,029751	330,0071	0,721778	1,122965

2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

$$\mu = (\mu_0 + \gamma_r) / (1 + \gamma_r) \quad (2.20)$$

Значение показателя политропы сжатия находится методом последовательных приближений

$$n_1 = 1 + \frac{8.314}{20.16 + 1.738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a} \quad (2.21)$$

Давление, температура и удельный объём в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \quad \text{МПа} \quad (2.22)$$

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad \text{К} \quad (2.23)$$

Удельный объём, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, при угле опережения зажигания Θ ,

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{\lambda} \right\} - \left\langle \cos \Theta \right\rangle + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2} \left\langle \sin \Theta \right\rangle \right] \right]; \quad (2.24)$$

$$P_y = P_a \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1}; \text{МПа}; \quad T_y = T_a \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1-1}; \text{К}; \quad (2.25)$$

Результаты расчета процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Давление, температура и удельный объём в конце сжатия и воспламенения:

н, мин ⁻¹	μ	n _l	P _c , МПа	T _c , К	Θ°ПКВ	V _y , м ³ /кг	P _y , МПа	T _y , К
900	1,050601	1,3702	2,337381	828,9211	12	0,11026	1,967552	791,23
2000	1,03894	1,374725	2,273893	824,503	14	0,117763	1,80708	774,445
3500	1,039063	1,37283	2,194925	805,3634	16	0,124724	1,639063	743,95
5000	1,038972	1,37496	2,086875	806,2679	19	0,141498	1,405866	723,92
5600	1,050855	1,37538	2,045133	804,9556	24	0,164719	1,143217	686,809
Двигатель ВАЗ-2112								
900	1,060488	1,37058	2,364652	823,3493	15	0,115161	1,823871	767,52
2600	1,050596	1,372	2,259369	811,433	20	0,134725	1,469604	722,15
3700	1,050718	1,3728	2,180028	808,4022	23	0,150917	1,267603	697,78
5000	1,050909	1,37378	2,122703	795,8551	26	0,166039	1,098591	665,27
5600	1,050917	1,3753	2,044748	797,5824	28	0,182916	0,977444	652,08

2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания

Коэффициент выделения теплоты δ , учитывающий неполное сгорание топлива;

$$\delta = \frac{H_u - 119950(\alpha - 1)}{H_u}, \quad (2.26)$$

Коэффициент эффективности сгорания топлива ξ :

$$\xi = \delta \cdot \Psi; \quad (2.27)$$

Удельная теплота сгорания рабочей смеси

$$q_z = \frac{\xi \cdot H_u}{(1 + \gamma_r) \cdot (\xi \cdot l_0 + 1)}; \text{ кДж/кг.} \quad (2.28)$$

$$E_2 = \left(0.002 \frac{\varepsilon}{V_a} \right) q_z; \text{ МПа} \quad (2.29)$$

Давление газов в процессе сгорания

$$P_2 = \frac{E_2 \Delta X_{1-2} + P_1 \cdot (K_{1-2} \psi \varphi'_1 - \psi \varphi'_2)}{K_{1-2} \psi \varphi'_1 - \psi \varphi'_2}, \quad (2.30)$$

где $\psi \varphi'_1 = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left(\cos \varphi' + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi'} \right) \right]; \quad (2.31)$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$X_{1-2} = \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right], \quad (2.32)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2;

$$\Delta X_{1-2} = \frac{1}{2} \left[\exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.33)$$

Отношение средних теплоёмкостей рабочего тела на участке 1-2.

$$k_{1-2} = 1.259 + \left[76.7 - \left(13.6 - \frac{14.2}{\alpha} \right) x_{1-2} \right] \frac{1}{T_{1-2}} - \left(0.0665 - \frac{0.0245}{\alpha} \right) x_{1-2} \quad (2.34)$$

Фактор теплоёмкостей K_{1-2}

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} \quad (2.35)$$

Средняя температура T_{1-2} на участке 1-2. Здесь температура T_2 определяется методом пробных подстановок.

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.36)$$

Определив k_{1-2} производят все вычисления для определения P_2 , а затем вычисляют температуру T_2 газов в процессе сгорания по следующей зависимости:

$$T_2 = \frac{T_y P_2 \Psi(\varphi'_2)}{P_y \Psi(\varphi'_2) \mu_{1-2}}, \quad (2.37)$$

где:

$$\Psi(\varphi'_2) = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} * \sigma; \quad (2.38)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} * \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot (\sin(\varphi'))^2} \right]; \quad (2.39)$$

средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси,

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} - \mu_1 = 1 + \frac{\mu_{0\max} - 1 \left[1 - \exp \left[-6.908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right]}{1 + \gamma_r}. \quad (2.40)$$

Доля выгоревшего топлива χ рассчитывается по уравнению выгорания:

$$\chi = 1 - \exp \left[-6.908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right]. \quad (2.41)$$

Основные коэффициенты термодинамического расчета приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Коэффициенты термодинамического расчета

n, мин ⁻¹	δ	Ψ	ζ	q _z , Дж/кг	E ₂ , МПа	φ_z , град, ПКВ.	m
900	1	0,87	0,87	2311,506	47,544497	28	2
2000	1	0,9	0,9	2291,177	45,990604	36	2.2
3500	1	0,93	0,93	2375,011	47,11143	42	2.4
5000	1	0,95	0,95	2420,459	45,59819	50	2.6
5600	1	0,99	0,99	2643,545	48,99202	54	2.8
Двигатель ВАЗ-2112							
900	0.9435	0,81	0,764277	2095,696	43,98798	40	3.1
2600	1	0,86	0,86	2284,733	46,40438	48	3.2
3700	1	0,96	0,96	2556,549	50,28953	55	3.3
5000	1	0,97	0,97	2592,875	50,44589	58	3.4
5600	1	0,99	0,99	2646,799	49,49647	62	3.5

Расчёт текущих параметров процесса сгорания проводится с определённым шагом – 1⁰ ПКВ и приведен в Приложении А и на плакате теплового расчета.

2.7 Расчет процессов расширения и выпуска

Степень последующего расширения при V_z

$$\delta = V_a / V_z \quad (2.44)$$

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

$$n_2 = 1 + \frac{8.314}{23.7 + 0.0046 \left(\frac{1}{\delta^{n_1-1}} + 1 \right) \cdot T_z}; \quad (2.45)$$

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \text{МПа} ; \quad (2.46)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \text{ К} ; \quad (2.47)$$

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры в процессе расширения находят по следующим формулам:

$$V_{PT} = \frac{V_a}{\varepsilon} \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{1} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos \varphi_{PT} \right] \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi_{PT}} \right) \right] , \quad (2.48)$$

$$P_{PT} = P_b \cdot \left(\frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2} ; \quad (2.49)$$

$$T_{PT} = T_b \left(\frac{V_a}{V_T} \right)^{n_2-1} ; \quad (2.50)$$

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов, произведём проверку

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{P_b/P_r}} \quad \text{К} \quad (2.51)$$

погрешность расчёта Δ :

$$\Delta = \frac{100 (T_r - T'_r)}{T_r} \% \quad (2.52)$$

Результаты расчета процесса расширения и выпуска приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Расчет процесса расширения и выпуска

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_z, \text{м}^3$	$T_z, \text{К}$	$P_z, \text{МПа}$	δ	n_2	$P_b, \text{МПа}$	$T_b, \text{К}$	$T_r, \text{К}$	$\Delta, \%$
900	0,120284	3019,243	7,230007	8,48804	1,177	0,58329	2067,555	1163,224	0,2779
2000	0,143871	2907,209	5,768566	7,27169	1,1796	0,55548	2035,725	1169,602	-0,034
3500	0,162852	2889,058	5,06501	6,50078	1,1795	0,55682	2064,706	1199,442	0,3717
5000	0,197929	2831,083	4,08341	5,63196	1,1804	0,53085	2072,834	1245,126	0,8199
5600	0,195495	3009,4	4,435073	5,79622	1,17476	0,56284	2213,654	1315,048	1,157
Двигатель ВАЗ-2112									
900	0,1494	2639,83	5,121	6,688	1,188	0,5354	1846,58	1086,178	0,572
2600	0,1684	2756,27	4,714	6,139	1,1835	0,5504	1975,7	1162,08	0,093
3700	0,1951	2913,76	4,303	5,474	1,1775	0,5815	2155,05	1244,545	-0,036
5000	0,1972	2929,05	4,279	5,474	1,1767	0,5789	2168,77	1265,439	0,0347
5600	0,2052	2976,31	4,179	5,474	1,175	0,5669	2209,79	1309,556	0,349

2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла

Теоретическая индикаторная работа цикла определяется по методу трапеций:

$$L_{iT} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{1i} + P_{2i}}{2} |V_{2i} - V_{1i}|; \quad (2.53)$$

Расчётное среднее индикаторное давление

$$P_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{\pi - 1 \bar{V}_a}, \quad \text{МПа} \quad (2.54)$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = 8.314 \frac{M_1 \cdot P_{iT} \cdot T_0}{P_0 \cdot \eta_v \cdot H_u} \quad (2.55)$$

Удельный индикаторный расход топлива

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u} \cdot 10^3, \quad \text{г/кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.56)$$

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Индикаторные показатели рабочего цикла

n , мин ⁻¹	L_i , кДж	P_i , Мпа	N_i , кВт	η_i	g_i , г/кВт*ч
900	1,1718807	1,26863	14,27209	0,489426	167,4399
2000	1,1166917	1,17975	29,49376	0,456318	179,5886
3500	1,1498939	1,200507	52,5222	0,440856	185,8873
5000	1,1350542	1,125416	70,33848	0,458662	178,6709
5600	1,2659878	1,234851	86,43956	0,498398	164,4257
Двигатель ВАЗ-2112					
900	1,0012	1,1060343	12,442886	0,4289854	191,03093
2600	1,09	1,1651984	37,868947	0,4405874	186,00051
3700	1,1957	1,2379594	57,255621	0,4484105	182,75552
5000	1,224	1,2533459	78,334121	0,4813589	170,24613
5600	1,2406	1,2210353	85,47247	0,4929888	166,22992

2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя

Давление механических потерь при $S/D = 71/82 = 0.865$, если средняя ско-

рость поршня: $v_n = \frac{Sn}{30}$, м/с

Среднее давление механических потерь

$$P_M = 0.034 + 0.0113v \quad , \text{ МПа} \quad (2.57)$$

Среднее эффективное давление

$$P_e = P_{iT} - P_M, \text{ МПа} \quad (2.58)$$

Механический К.П.Д.

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{iT}} \quad (2.59)$$

Эффективный К.П.Д.

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M \quad (2.60)$$

Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.61)$$

Эффективная мощность

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_L \cdot n}{30\tau}, \text{ кВт} \quad (2.62)$$

Часовой расход топлива

$$G_T = N_e \cdot g_e, \text{ кг/ч} \quad (2.63)$$

Крутящий момент

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.64)$$

Результаты расчета эффективных показателей двигателя приведены в таблице 2.8. Графически они представлены на плакате ВСХ.

Таблица 2.8 - Эффективные показатели двигателя

n , мин ⁻¹	$V_{п.ср}$, м/с	p_m , Мпа	p_e , Мпа	η_m	η_e	g_e , г/(кВт.ч)	N_e , кВт	M_e , Н.м	G_T , кг/ч
900	2,13	0,0671	1,2035	0,9471	0,4643	176,4996	13,539	143,64	2,389
2000	4,733	0,10148	1,0827	0,9143	0,4188	195,6686	27,069	129,23	5,296
3500	8,283	0,14834	1,0537	0,8765	0,3869	211,7794	46,1	125,76	9,763
5000	11,833	0,1952	0,9290	0,8263	0,3786	216,43	58,067	110,88	12,567
5600	13,253	0,2139	1,0188	0,8264	0,4112	199,2899	71,317	121,59	14,212
Двигатель ВАЗ-2112									
900	2,13	0,0671	1,0389	0,9393	0,4029	273,3719	11,68	123,99	3,377
2600	6,153	0,1202	1,0449	0,8968	0,3951	267,3998	33,96	124,72	9,043
3700	8,756	0,1546	1,0834	0,8751	0,3924	258,8332	50,11	129,3	12,464
5000	11,833	0,1952	1,0581	0,8442	0,4064	261,652	66,13	126,29	15,336
5600	13,253	0,2139	1,0071	0,8248	0,4066	271,5434	70,49	120,19	17,208

2.10 Тепловой баланс двигателя

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом: [1]

$$Q_o = \frac{H_u G_T}{3.6} = \frac{43930 G_T}{3.6} = 12203 G_T \quad (2.65)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

$$Q_e = 1000N_e \text{ и } q_e = Q_e * 100/Q_0 \quad (2.66)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

$$Q_B = \frac{ciD^{1+2m}n^m(H_u - \Delta H_u)}{\alpha H_u}, \quad (2.67)$$

$$q_B = Q_B * 100/Q_0; \quad (2.68)$$

Теплота, унесенная с отработанными газами:

$$Q_r = \left(\frac{G_T}{3.6}\right) M_2 \left[mc_V''^{t_r} + 8.315 t_r \right] - M_1 \left[mc_V''^{t_{20}} + 8.315 t_{20} \right], \quad (2.69)$$

$$q_r = Q_r * 100/Q_0 \quad (2.70)$$

где $(mc_V)_{t_0}^{20} = 20.775$ кДж/(кмоль*град) – теплоемкость свежего заряда (воздуха) (определяется по таблице 6 – [1]) при 20°C.

$(mc_V'')_{t_0}^{t_r}$ - теплоемкость остаточных газов, определяется по (таблице 7 – [1]) методом интерполяции при соответствующих α и t_r .

Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива отсутствует, так как на всех режимах поддерживается стехиометрический состав топливовоздушной смеси.

$$Q_{н.с} = \Delta H_U * G_T / 3,6 \quad (2.71)$$

$$q_{н.с} = Q_{н.с} * 100/Q_0 \quad (2.72)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_B + Q_r + Q_{н.с}), \quad (2.73)$$

$$q_{ост} = Q_{ост} * 100/Q_0 \quad (2.74)$$

Результаты расчетов тепловой баланс двигателя сводим в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 - Тепловой баланс разрабатываемого двигателя

n , МИН ⁻¹	G_T , кг/ч	Q_0 , Дж/с	Q_e , Дж/с	q_e , %	Q_B , Дж/с	q_B , %	Q_T , Дж/с	q_T , %	$Q_{н.с.}$, Дж/с	$q_{н.с.}$, %	$Q_{ост.}$, Дж/с	$q_{ост.}$, %
900	2,389	23363	8432	36,1	6352	27,2	6080	26,0	0	0	1181	5,1
2000	5,296	42977	16556	38,5	12405	28,9	12509	29,1	0	0	1508	3,5
3500	9,763	60525	22048	36,4	18022	29,8	18004	29,7	0	0	2450	4,0
5000	12,56	107949	33381	30,9	34522	32,0	35201	32,6	0	0	4845	4,5
5600	14,21	115752	33212	28,7	35804	30,9	36961	31,9	0	0	6514	5,6

3 Расчет кинематики двигателя

Премещение поршня

$$S_x = R \left[\cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cos 2\varphi \right] \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Скорость поршня

$$v_{\Pi} = \omega R \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с.} \quad (3.2)$$

Ускорения поршня

$$j = \omega^2 R \left[\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi \right] \text{ м/с}^2. \quad (3.3)$$

Расчет S_x , v_{Π} и j_n производится аналитически через каждые 10^0 угла поворота коленчатого вала. Расчитанные значения ускорения поршня представлены в таблице 3.1, и на плакате кинематики КШМ.

Таблица 3.1 - Перемещение, скорость и ускорение поршня

φ°	S_x , мм	V_{Π} , м/с	J , м/с ²	φ°	S_x , мм	V_{Π} , м/с	J , м/с ²
0	0,0	0,0	15767	180	71,0	0,0	-8614
10	0,7	4,1	15366	190	70,6	-3,1	-8644
20	2,8	8,1	14195	200	69,5	-6,1	-8716
30	6,1	11,7	12346	210	67,5	-9,1	-8769
40	10,5	14,9	9960	220	64,8	-11,9	-8717
50	15,7	17,4	7215	230	61,4	-14,4	-8457
60	21,7	19,3	4307	240	57,2	-16,7	-7884
70	28,0	20,5	1430	250	52,2	-18,6	-6909
80	34,4	21,0	-1244	260	46,7	-20,0	-5478
90	40,7	20,8	-3577	270	40,7	-20,8	-3577
100	46,7	20,0	-5478	280	34,4	-21,0	-1244
110	52,2	18,6	-6909	290	28,0	-20,5	1430
120	57,2	16,7	-7884	300	21,7	-19,3	4307
130	61,4	14,4	-8457	310	15,7	-17,4	7215
140	64,8	11,9	-8717	320	10,5	-14,9	9960
150	67,5	9,1	-8769	330	6,1	-11,7	12346
160	69,5	6,1	-8716	340	2,8	-8,1	14195
170	70,6	3,1	-8644	350	0,7	-4,1	15366
180	71,0	0,0	-8614	360	0,0	0,0	15767

4 Динамический расчет двигателя

4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

С учетом диаметра цилиндра, отношения S/D , рядного расположения цилиндров и достаточно высокого значения p_z устанавливаются:

- масса поршневой группы (для поршня из алюминиевого сплава $m_n=100$ кг/м²)

$$m_n = m_n \cdot F_n = 100 \cdot 0,005282 = 0,528 \text{ кг}; \quad (4.1)$$

- масса шатуна (для стального кованного шатуна $m_{ш}=150$ кг/м²)

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot F_n = 150 \cdot 0,0052783 = 0,792 \text{ кг}; \quad (4.2)$$

- масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов

$$m_k = m_k \cdot F_n = 140 \cdot 0,0052783 = 0,739 \text{ кг}. \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$m_{ш.п.} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,792 = 0,218 \text{ кг} \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа

$$m_{ш.к.} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,792 = 0,574 \text{ кг} \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение

$$m_j = m_n + m_{ш.п.} = 0,528 + 0,218 = 0,746 \text{ кг}. \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение

$$m_R = m_{\kappa} + m_{ш.к} = 0,739 + 0,574 = 1,313 \text{ кг.} \quad (4.7)$$

4.2 Силы инерции

Определяем значения силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс

$$P_j = -m_j j = 0,746 * j \quad (4.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра

$$K_{Ru} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,574 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -6,9974 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{R\kappa} = -m_{\kappa} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,739 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -9,0088 \text{ кН.} \quad (4.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_R = -m_R \cdot R \cdot \omega^2 = -1,0313 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -16,0062 \text{ кН.} \quad (4.11)$$

4.3 Суммарные силы

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$P = \Delta P_r + P_j \quad (4.12)$$

Нормальная сила

$$N = P \operatorname{tg} \beta . \quad (4.13)$$

Сила (кН), действующая вдоль шатуна

$$S = P * \frac{1}{\cos \beta} . \quad (4.14)$$

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа

$$K = P * \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta . \quad (4.15)$$

Полная тангенциальная сила (кН)

$$T = \frac{p \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} . \quad (4.16)$$

Результаты динамического расчета графически представлены на плакате.

4.4 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра

$$M_{кр.ц} = T \cdot R . \quad (4.17)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ц.} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = \frac{145}{0,86} = 168 \text{ Н} \cdot \text{м} ; \quad (4.18)$$

- по площади, заключенной под кривой $M_{кр.}$

$$M_{кр.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 155 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.19)$$

Ошибка

$$\Delta = (168-161) \cdot 100/168 = 4,2\% \quad (4.20)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр.маx} = 409,5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.21)$$

$$M_{кр.миn} = - 57,0 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.22)$$

4.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа

$$P_k = K + K_{Rш} = (K - 5108) \text{ Н}. \quad (4.23)$$

Значения $R_{ш.ш.}$ для различных φ занесены в таблицу 4.3. Диаграмма $R_{ш.ш.}$ в прямоугольных координатах приведена на плакате.

Среднее значение $R_{ш.ш.}$ определяется по развернутой диаграмме

$$R_{ш.ш.ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9342 \text{ Н} \quad (4.24)$$

4.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа

$$K_{P_k} = P_k + K_{Rk} = (P_k - 15324), H \quad (4.28)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала

$$R_k = \sqrt{R_{u.u}^2 + K_{Rk}^2} \quad (4.29)$$

4.7 Силы, действующие на коренные шейки

Сила, действующая на первую коренную шейку

$$R_{к.ш.1} = -0,5 * R_{k1} \quad (4.30)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (4.31)$$

где:

$$T_{k2} = -0.5 * (T_1 + T_2 * \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 * (T_1 + T_2 * \cos 180^\circ - K_{pk2} * \sin 180^\circ) = -0.5 * (T_1 - T_2); \quad (4.32)$$

$$K_{k2} = -0.5 * (K_{pk1} + T_2 * \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 * (T_1 + T_2 * \sin 180^\circ - K_{pk2} * \cos 180^\circ) = -0.5 * (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (4.33)$$

Сила, действующая на третью коренную шейку

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2}, \quad (4.34)$$

где:

$$T_{k3} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (T_2 + T_3); \quad (4.35)$$

$$K_{k3} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (4.36)$$

Диаграммы $R_{к.ш1}$, $R_{к.ш2}$, $R_{к.ш3}$, перестроены в прямоугольные координаты.

По этим диаграммам определяем:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9325 \text{ H} \quad , \quad (4.36)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш2ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3350 \text{ H} \quad , \quad (4.37)$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 18058 \text{ H} \quad , \quad (4.38)$$

4.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя

Равномерность крутящего момента

$$\mu = \frac{M_{кр.маx} - M_{кр.миn}}{M_{кр.ср.}} = \frac{199,87 - (201,57 - 147,93)}{147,93} = 4,74 \quad . \quad (4.49)$$

Избыточная работа крутящего момента

$$L_{изб} = A * 4 * \pi / (4 * 90) = 16961 * 4 * \pi / 360 = 592,05 \text{ Дж} \quad , \quad (4.50)$$

где $L_{изб}$ - площадь над прямой среднего крутящего момента.

Равномерность хода двигателя принимаем $\delta = 0,015$.

Момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к оси коленчатого вала

$$I_0 = L_{изб} / (\delta * \omega^2) = 592,02 / (0,015 * 586^2) = 0,115 \text{ кг} * \text{м}^2 \quad . \quad (4.51)$$

5 Специальная часть

5.1 Расчет электромагнитной форсунки

Расчет проходного сечения электромагнитной форсунки

1. Определяем максимальную цикловую подачу топлива:

$$Q_{\max} = \frac{g_e \cdot N_e \cdot \tau}{120 \cdot n_{\max} \cdot \rho_T} = \frac{270 \cdot 71,3 \cdot 4 \cdot 1000}{120 \cdot 6200 \cdot 790} = 0,1218 \text{ см}^3 / \text{цикл} \quad (5.1)$$

2. Период следования подач при групповом впрыске определяется по формуле:

$$T_{\min} = \frac{60 \cdot \tau'}{j \cdot n_{\max}} \cdot 10^3 = \frac{60 \cdot 2}{2 \cdot 6400} \cdot 1000 = 9,677 \text{ мс} \quad (5.2)$$

где $\tau' = 2$ – коэффициент тактности для 4х тактного двигателя; $j = 2$ – кратность впрыска.

Для определения пределов продолжительности электрических импульсов учтем работу форсунок при максимальной цикловой подаче, чтобы форсунки не потеряли управляемости, между управляющими импульсами должна быть пауза не меньше величины отпуска, то есть $t_{\text{отн}} = t_{\text{мс}}$

Следовательно, максимальная продолжительность управляющих импульсов определяется:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &\leq T - t_{\text{отн}} = 9,677 - 1 = 8,677 \text{ мс}; \\ \tau_{\max} &\leq 8,677 \text{ мс} \end{aligned} \quad (5.3)$$

3. Требуемая статическая производительность форсунки:

$$g_0 = \frac{Q_{\max}}{j \cdot \tau_{\max}} = \frac{0.1210}{2 \cdot 8.677} = 0.00702 \text{ см}^3 / \text{мс} = 7,02 \text{ мм}^3 / \text{мс} \quad (5.4)$$

4. Диаметр дозирующего отверстия определяется на основе формул: зная, что перепад давления топлива на клеммах форсунки $\Delta p = 400 \text{ кПа}$, можно определить площадь эффективного сечения клапана:

$$\mu \varnothing \cdot f \varnothing = g_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_T}} = 7.02 \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \cdot 10^3}{790}} = 0.2234 \text{ мм}^2, \quad (5.5)$$

где $\mu \varnothing \cdot f \varnothing$ – площадь эффективного сечения клапана форсунки;

μ – коэффициент расхода топлива электробензонасосом,

$\mu \varnothing = 0,96$ (из справочного материала).

$f \varnothing = 0,2234 / 0,96 = 0,234 \text{ мм}^2$; тогда $f = 0.234 / 2 = 0.1163 \text{ мм}^2$

определяем диаметр дозирующего отверстия:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.1163}{3.14}} = 0.37 \text{ мм} \quad (5.6)$$

Электромагнитная форсунка является исполнительным элементом впрыска распределяющим топливо по цилиндрам ДВС. Оценку быстродействия форсунки проведем, используя конструктивную схему электромагнитной форсунки и эквивалентной электрической схемы:

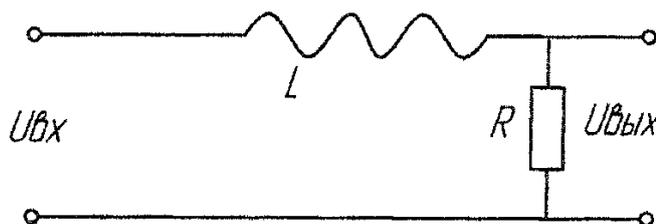


Рисунок 5.1 – Эквивалентная электрическая схема электромагнитной форсунки

Дифференциальное уравнение форсунки

$$T \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}; T = L/R \quad (5.7)$$

Дифференциальное уравнение в операторной форме:

$$\begin{aligned} (P+1)U_{\text{вых}} &= U_{\text{вх}} \\ A \varphi &= \frac{1}{\sqrt{1+\omega^2 \cdot T^2}}; \varphi = -\arctg \omega T \\ T &\rightarrow L \rightarrow R \\ F &\geq F_{\text{пруж}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Конструирование электромагнита форсунки.

Такое усилие электромагнита $F_{\text{э}} = 26H$ можно получить по формуле:

$$F_{\text{э}} = -\left(\frac{Jw^2}{2}\right) \cdot \mu_0 S \frac{1}{x^2}, H \quad (5.9)$$

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А} \cdot \text{м}$ - магнитная постоянная воздушного зазора;

x – величина радиального зазора;

S – площадь поперечного сечения сердечника;

Допустим, что $D = 15,0\text{мм} = 0,015\text{м}$; $d = 8,0\text{мм} = 0,008\text{м}$; $x = 1,2\text{мм} = 0,0012\text{м}$.

Тогда

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{3,14}{4} (0,015^2 - 0,008^2) = 1,264 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 126,4 \text{ мм}^2 \quad (5.10)$$

Исходя из этого определяем:

$$\langle w \rangle = \frac{4 \cdot F \cdot x^2}{\mu_0 \cdot S} = \frac{4 \cdot 26 \cdot 0.0012^2}{1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 1.264 \cdot 10^{-4}} = 942569,71 \text{ мм}^2/\text{мс} \quad (5.11)$$

$$Jw = \sqrt{942569,71} = 970,86$$

Принимаем $J = 1,5$ $w = \frac{970,86}{1,5} = 647,24$ витков. Принимаем $w=647$ витков.

Определяем индуктивность катушки:

$$L = \frac{0,2 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot S}{x} \cdot 10^{-8} = \frac{0,2 \cdot 3,14 \cdot 647^2 \cdot 1,264 \cdot 10^{-4}}{0,0012} = 2,8 \text{ Гн} \quad (5.12)$$

Длину l катушки электромагнита определяем из условия размещения в ней провода $d = 0,4$ мм.

Площадь поперечного сечения провода с изоляцией:

$$S_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,47^2}{4} = 0,1736 \text{ мм}^2 \quad (5.12)$$

Длина катушки электромагнита:

$$\lambda = \frac{S_{np} \cdot w \cdot 2}{D - d} = \frac{0,1736 \cdot 647 \cdot 2}{15 - 8} = 32,1 \text{ мм} \quad (5.13)$$

Определяем сопротивление обмотки электромагнита:

Длина 1-го витка:

$$d_{cp} = \frac{D + d}{2} = \frac{0,015 + 0,008}{2} = 0,0115 \text{ м} \rightarrow \lambda' = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 0,0115 = 0,036 \text{ м} \quad (5.14)$$

Длина всей обмотки:

$$\lambda_{обм} = \lambda' \cdot w = 0,036 \cdot 647 = 23,29 \text{ м} \quad (5.15)$$

Сопротивление 1м провода $d = 0.4\text{мм}$: $R' = 3.89 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$

Сопротивление всей катушка:

$$R = R' \cdot \lambda_{\text{обм}} = 3,89 \cdot 10^{-2} \cdot 23,29 = 0,91 \text{ Ом} \quad (5.16)$$

Постоянная времени электромагнита:

$$T = L/R = 2.8 \cdot 10^{-4} / 0.91 = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (5.17)$$

5.2 Оценка влияния эффективности непосредственного впрыска

Для того чтобы создать нагрузку, которая гарантирует нормальное управление автомобилем в условиях города, топливо впрыскивается с опозданием, как в дизельном двигателе. Таким образом, достигается ультра обедненная смесь, поскольку стратифицированная смесь воздуха и топлива формируется идеально. На высоких нагрузках топливо впрыскивается в впускном цикле. Таким образом, создается однородная смесь воздуха и топлива, как в традиционном МРІ, для придания большей мощности.

Режим ультра обедненного сгорания

В большинстве случаев вождения автомобиля и на скорости до 120 км/ч, двигатель работают в режиме ультра обедненной смеси для того, чтобы потреблять меньше топлива. В таком режиме впрыск топлива происходит на поздней стадии сжатия в цилиндре, и зажигание происходит на уровне ультра обедненной смеси от 30 к 40 (от 35 к 55), включая рециркуляцию.

Режим повышенной мощности

Когда двигатель GDI работает на максимальной нагрузке или на высокой скорости, впрыск топлива происходит в момент открытия впускного клапана на стадии впуска. Это оптимизирует сгорание, делая смесь более однородной и холодной, что минимизирует возможность детонации в двигателе.

Технология создания GDI

Существуют четыре фактора, которые создали технологию. Точно Вертикальный Впускной Канал подает оптимальное количество воздуха в цилиндр. Поршни с выемками на вертикальной плоскости управляют сгоранием, поскольку помогают сформировать воздушно-топливную смесь. ТНВД подает топливо под давлением, необходимым для прямого впрыска в цилиндр. Инжектор Высокого Давления управляет процессом распыления, и дисперсии топливной струи.

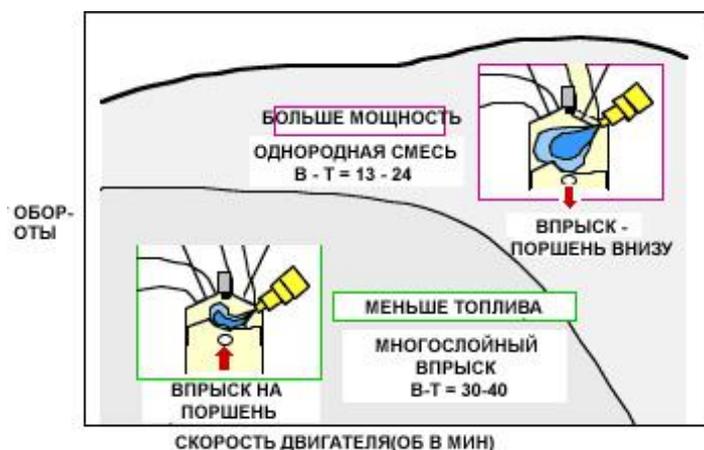


Рисунок 5.2 - Режимы работы двигателя при высокой эффективности процесса сгорания

Эти фундаментальные технологии, соединенные с другими уникальными технологиями контроля топлива позволили достигнуть обеих целей своего исследования – понижение потребления топлива по сравнению с дизельными двигателями и повышения мощности большей, по сравнению с традиционными MPI. Рассмотрим методы достижения этих целей.

Распыление топлива

Новые инжектора высокого давления гарантируют идеальное распыление для заданной нагрузки двигателя, что показано на рисунке 5.2. В то же время, поток топлива завихряется, что позволяет топливу оптимально атомизироваться, что обязательно для двигателя типа GDI даже на сравнительно низком уровне давления в 50 кг/см^2 .

Оптимальная Конфигурация Камеры Сгорания

Поршни с выемками на верхней площадке управляют смешиванием воздуха и топлива, а также потоком воздуха внутри камеры сгорания. Это важная роль в поддержании компактности воздушно-топливной смеси Смесь, которая

впрыскивается с запаздыванием на поршень, направляется к свече зажигания до того, как она заработает.



Рисунок 5.3 - Распыление топлива инжектором при непосредственном впуске топлива

Доказано, что воздушно-топливная смесь с оптимальной плотностью собирается вокруг свечи зажигания в стратифицированном состоянии stratified charge. Это подтверждается также анализом того, как ведет себя топливный поток непосредственно перед зажиганием и во время смешивания с воздухом, рисунке 5.3.

В результате достигается удивительно стабильное сгорание ультра обедненной смеси с отношением 40 (55 вместе с рециркуляцией) как это показано ниже, рисунке 5.4:



Рисунок 5.4 - Обеспечение необходимых условий распыления топлива для работы на бедной смеси

6 Безопасность и экологичность проекта

6.1 Нормы по ограничению токсичности отработавших газов ДВС

В настоящее время Российская Федерация обладает необходимой правовой и нормативно-технической базой, предметом регулирования которой являются вопросы экологической безопасности, в том числе, в отношении двигателей внутреннего сгорания. Эта нормативно-правовая база включает документы общероссийской и международной юрисдикции.

В 1987 г. Россия стала полноправным участником Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН). Наличие такого международного статуса обязывает каждое государство соблюдать определённые правила (R) ЕЭК ООН:

1. Правила ЕЭК ООН R 49 (49-02, 49-03, 49-04*) "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия и двигателей, работающих на природном газе, а также двигателей с принудительным зажиганием, работающих на сжиженном нефтяном газе, и транспортных средств, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия, двигателями, работающими на природном газе, и двигателями с принудительным зажиганием, работающими на сжиженном нефтяном газе, в отношении выделяемых ими загрязняющих веществ".

2. Правила ЕЭК ООН R 83 (83-02, 83-03, 83-04, 83-05*) "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выброса загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей".

3. Правила ЕЭК ООН R 96 (96-01*) "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных тракторах и внедорожной технике в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями".

В Правилах R 49 и R 96 ЕЭК ООН, введённом в действие в 1982 г., изложены основные требования, предъявляемые к отработавшим газам автотранспортных двигателей в отношении их токсичности. Позже были приняты допол-

нения (поправки) к Правилу R 49, получившие определённые условные наименования.

Особенности использования Правила R 49 ЕЭК ООН применительно к автотранспортной технике заключаются в том, что она (эта техника должна соответствовать только тем требованиям в части ограничения токсичности, которые действовали на момент её производства, то есть к такой технике не могут быть применены более жёсткие требования, вводимые в действие в последующих (относительно года выпуска) нормативно-правовых документах.

Введение в действие технических нормативов выбросов в отношении автомобильной техники, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, осуществляется в следующие сроки:

- а) экологического класса 2 (Евро – 2) - с даты вступления в силу настоящего регламента;
- б) экологического класса 3 (Евро – 3) - с 1 января 2008 г.;
- в) экологического класса 4 (Евро – 4) - с 1 января 2010 г.;
- г) экологического класса 5 (Евро – 5) - с 1 января 2014 г.

6.2 Нормы по ограничению шума автотранспортных ДВС

С 1.01.05. года введен в действие ГОСТ Р 52231-04 «Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения». В разделе стандарта «Область применения» отличается, тем что он устанавливает допустимые уровни методы измерения внешнего шума автомобилей категорий М1, М2, М3, N1, N2, N3(по ГОСТ Р 52051) при оценке их технического состояния в эксплуатации.

ГОСТ Р 41.51-2004(Правила ЕЭК ООН №51) Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств, имеющих не менее четырех колес, в связи с производимым ими шумом.

Если не указаны контрольные значения уровня шума, то допустимый уровень шума выпускной системы автомобиля не должен превышать приведенных значений.

6.3 Сравнение токсичности отработавших газов и шуму проектируемого ДВС с принятыми нормативными стандартами

6.3.1 Сравнение токсичности отработавших газов проектируемого ДВС с принятыми нормами

В таблице 6.1 приведен сравнительный анализ токсичности отработавших газов проектируемого ДВС и двигателя ВАЗ-21103 в соответствии с принятыми нормами.

Таблица 6.1 - Сравнение токсичности отработавших газов

Токсическое вещество	Единица измерения	Евро - 2	Евро - 3	Евро - 4	Евро - 5	Евро - 6	ВАЗ-21103 без катализатора	ВАЗ-21103 с катализатором	Проект без катализатора	Проект с катализатором
Оксид углерода	г/км	2,2 (В) 1,0 (D)	2,3 (В) 0,64 (D)	1,0 (В) 0,5 (D)	1,0 (В) 0,5 (D)	1,0 (В) 0,5 (D)	6,694	0,484	6,694	0,484
Углеводороды	г/км	-	0,2 (В)	0,1 (В)	0,1 (В)	0,1 (В)	1,48	0,125	1,38	0,115
Оксиды азота	г/км	-	0,5 (D)	0,25 (D)	0,25 (D)	0,25 (D)	2,1	0,08	2,0	0,075
Твёрдые частицы	г/км	0,08	0,05	0,025	0,025	0,025	0	0	0	0

Токсичность отработавших газов в проектированном двигателе несколько повышается по углеводородам в связи с большей площадью замороженного пристеночного слоя, остается неизменной по оксидам углерода, и незначительно снижается по оксидам азота NO, в связи с уменьшением максимальной температуры сгорания ТВС, но при этом общая токсичность находится в допустимых ГОСТом пределах.

6.3.2 Сравнение шумности проектируемого ДВС с принятыми нормами

Приведем в таблице 6.2 сравнительный анализ уровня шума проектируемого ДВС и двигателя ВАЗ-21103 в соответствии с принятыми нормами.

Таблица 6.2 - Сравнение уровня шума

	Единица измерения	Допустимые уровни шума выпускной системы двигателей автомобилей, находящихся в эксплуатации	Двигатель ВАЗ-21103	Проектируемый двигатель
1	2	3	4	5
Уровень шума	дБА	96	86,5	88

Уровень шума в проектированном двигателе несколько повышается в связи с большей скоростью потока во впускном трубопроводе, но при этом он находится в допустимых ГОСТом пределах регламентирующих общий уровень внешнего шума автомобиля (ГОСТ Р 52051).

6.4 Основные преимущества двигателей типа GDI в сравнении с базовой серийной конструкцией двигателя ВАЗ-21103:

- Более низкое потребление топлива по сравнению с двигателем ВАЗ-21103 и даже с дизельными двигателями и соответственно меньшее количество выбросов углекислого газа (CO_2) согласно требований правила R 101 ЕЭК ООН.
- Достигается большая эффективная мощность ДВС по сравнению с двигателем ВАЗ-21103.

Залогом успешного внедрения технологии GDI послужила разработка нового типа инжектора системы питания ДВС, который позволил увеличить давление впрыска, гарантировать стабильный и точный поток топлива, а также возможность контроля подачи воздуха. Это позволило добиться стабильности прямого впрыска. В настоящее время технология GDI все более расширяется в

мировом автопроизводстве и это связано с дальнейшим ужесточением стандартов по выбросам ОГ в атмосферу.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) воспламеняют топливо распределенно в воздухе, при этом каждый тип используемого топлива имеет идеальное соотношение смеси, при котором топливо сгорит полностью или максимально полно. Этот физический процесс характеризуется стехиометрическим соотношением которое у бензина равно 14,7:1 (14,7 частей воздуха и 1 часть воздуха по весу).

6.5 Использование систем прямого впрыска топлива и расслоения заряда достигаемое на проектируемом двигателе

Она предусматривает использование резервуара давления и рампы, где давление регулируется до 120 бар. По причине использования высокого давления, топливо может впрыскиваться непосредственно в камеру сгорания через электромагнитные инжектора. Подача воздуха в ДВС регулируется электронным дросселем и количественно измеряется с помощью измерителя массы воздуха (расходомер воздуха). Для контроля топливно-воздушной смеси используется широкополосный кислородный датчик λ -зонд, который измеряет значения между 0,8 и бесконечностью.

Поскольку в двигателях с прямым впрыском используется концепция частичной нагрузки и работы на обедненной смеси, достигается меньший расход топлива. Впрыск топлива происходит непосредственно перед процессом его воспламенения в изолированную пространственную область рядом со свечой зажигания. Двигатель может работать с полностью открытым дросселем, что позволяет избежать насосных потерь. В работе многослойного впрыска уровень Лямбда находится в пределах 1,5 и 3, отношение воздуха к топливу 22:1 и 44:1. По сравнению с традиционным впрыском (впрыск во впускной трубопровод), экономится на 40% больше топлива при работе ДВС на холостых оборотах. По мере увеличения нагрузки на двигатель, увеличивается количество

впрыскиваемого топлива и многослойное облако становится более обогащенным и ухудшаются показатели токсичности ОГ, как и в дизельном двигателе может образовываться сажа. Чтобы предотвратить его появление, система непосредственного впрыска начинает работать в однородном режиме, т.е. все топливо подается в процессе впуска для получения гомогенной стехиометрической смеси. При этом используется более ранний впрыск и достигается уровень воздуха к топливу 14,7:1 и лямбда 1.

6.6 Оценка влияния расслоения заряда на снижение токсичности ОГ

Контроль отработавших газов

При работе на низких нагрузках, уровень NO_x нельзя сократить значительно, используя трехкомпонентный катализатор. Его выброс в атмосферу можно сократить значительно (на 70%), используя рециркуляцию перед тем, как газ попадет в катализатор. Но и этого мало, поэтому в частности, в конструкциях ДВС фирмы BMW использовали специальный накопительный катализатор в выхлопной системе, чтобы собирать окислы азота в форме нитратов (HNO_3) на своей поверхности. Однако, его возможность лимитированы размером аккумулятора. Поэтому он должен время от времени регенерироваться. Поэтому система управления ДВС переходит в третий режим работы время от времени работа на обогащенной смеси с однородным впрыском и $\lambda = 0,8$ и отношением воздуха к топливу как 12:1. Нитраты и СО превращаются в азот и кислород. При этом система управления двигателем должна принимать решение по изменению режима работы двигателя в течение менее одной секунды и так, чтобы это не было заметно водителю.

Предыдущие попытки разработать двигатель для работы на обедненной смеси упирались в проблему контролирования уровня выброса NO_x . Однако, в случае с двигателем типа GDI, 97% сокращение уровня NO_x достигается путем большей рециркуляции выхлопных газов. Стабильно перерабатываются 30%

выхлопного газа в двигателе GDI. Также используется новый тип катализатора для обедненного NO_x .

6.7 Выводы по разделу

Используемый в бакалаврской работе непосредственный впрыск топлива в цилиндр позволит значительно снизить расход топлива, а, следовательно уменьшить, массовые выбросы CO_2 с отработавшими газами. Реализуемое в нем расслоение заряда позволит уменьшить толщину пристеночного слоя и повысить полноту сгорания топлива, что значительно снизит токсичность по CH и CO , а для снижения NO потребуется применять специальный катализатор накопительного типа. Шум от процесса сгорания и выпуска отработавших газов принципиально не измениться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе спроектирован новый бензиновый двигатель с непосредственным впрыском топлива в цилиндр. Проведены основные расчеты двигателя, а именно, тепловой, кинематический, динамический, основных деталей и систем двигателя и расчет электромагнитной форсунки, проведена оценка влияния непосредственного впрыска и расслоения ТВС в КС на эффективность процесса сгорания и токсичность отработавших газов.

Получено в двигателе с расслоением ТВС:

- минимальный удельный эффективный расход топлива 242 г/кВт*ч, в среднем его снижение по сравнению с базовым составило 6-8%;
- максимальную мощность при номинальных оборотах $n=5600 \text{ мин}^{-1}$ 72 кВт, по сравнению с базовым увеличение составило 1-1,5%;
- снижение токсичности в отработавших газах по несгоревшим углеводородам (СН) и оксидам азота (NO).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
2. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.
3. Ховаха, М.С. Автомобильные двигатели – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /Под редакцией М.С. Ховаха// М.: Машиностроение, 1977. - с.636.
4. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /В.П. Алексеев, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. - с.528.
5. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. –4-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1984. – с.384
6. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. - с.296.
7. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
8. Кузнецов, Ю.М. Охрана труда на предприятиях автомобильного транспорта [Текст] /. М.: Транспорт, 1986.

9. Луканин, В.Н. Промышленная транспортная экология [Текст] / М.: Высшая школа, 2001.
10. Долин, П.А. Справочник по технике безопасности [Текст] / М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Dake, A.R. Modeling and control of cold start hydrocarbon emissions [Текст] / A.R. Dake // Master thesis. – 2005. - 101 с.
12. El-Mahallawy, F. Fundamentals and technology of combustion [Текст] / F. El-Mahallawy, S. E-Din Habik. – London : Elsevier, 2002. – 862 с.
13. Eriksson, L. Spark Advance Modeling and Control / L. Eriksson [Текст] // Doctoral thesis. – 1999. - 207 с.
14. Кузнецов, В.Р. Турбулентность и горение [Текст] / Кузнецов, В.Р., Собольников В.А.// М. Наука, 1986. - 207 с.
15. Войнов, В.В. Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / М. Наука, 1984. - 211 с.
16. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания [Текст] / М. Машиностроение, 1981. - 210 с.
17. Nlootat, G. A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours [Текст] / SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
18. Khalighi, B. Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations [Текст] / SAE, SP 1101, №950287, 2001. - с. 147-179,
19. Jones, P. Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment [Текст] / SAE, SP 1101, №950286, 2001. - с. 131-146
20. Наканиши, К. Разработка новой системы впуска для четырёхклапанного двигателя, работающего на бедных смесях [Текст] / SAE, SP 1097, №95050, 1997. - с. 25-43
21. Хашимото, Н. Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя [Текст] / SAE, SP 1098, №95068, 1998. - с. 347-365

22. Аносов, Ю.М. Основы отраслевых технологий и организации производства [Текст] / С-П., Политехника, 2002.
23. Каргин, С.А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением : канд. техн. наук : 05.08.05 / Каргин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.
24. Каменев, В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием: Дисс. . докт.техн.наук: 05.04.02 ГНЦ НАМИ / Каменев Владимир Федорович. - Москва, 1996. - 454 с.
25. Кутенёв, В.Ф. Комплексное решение проблем снижения выбросов вредных веществ и расхода топлива автомобильными двигателями. Автореф. дисс. докт. техн. наук. 05.04.02 / Кутенёв Вадим Федорович. - М.: МАМИ. - 1990. - 45 с.
26. Машиностроение. Энциклопедия [Текст] /: в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 2013.- Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания.- 784с.
27. Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя [Текст] // Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. - С. 130-140.
28. Смоленская, Н.М. Исследование эффективности рабочего процесса бензиновых двигателей с использованием электропроводности пламени [Текст] / Н.М. Смоленская, В.В. Смоленский, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // ВНТК "Проведение научных исследований в области машиностроения". 27-28 ноября 2009. Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2009. С.244-250.
29. Стечкин, Б.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский. – М. : АН СССР, 1960. – 200 с.
30. Рахимов, Р.Р. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием путем интенсификации сгорания бедных смесей : автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р. Р. Рахимов. - Волгоград: ВолГТУ, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ					
15	40	1	10,5	1,0524	1,824	767,539	1,002	0,8100	44,7856	0,0431	0,2930	3,2					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y (f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m ₁₋₂	X
0	-15	0,11538	0,0439	1,2085	6,5E-07	767,5393	767,5393	781,2473	767,5393	774,3933			1,3E-06	1,824	1	1	0
1	-14	0,11283	0,0383	1,1819	1,1E-05	781,2473	781,2473	787,7863	773,7579	784,5168	1,358	6,5859	2,2E-05	1,88026	1	1	1,29E-06
2	-13	0,11046	0,0331	1,157	5,3E-05	787,7863	787,7863	794,6313	779,9509	791,2088	1,3568	6,6059	0,00011	1,93606	1	1	2,37E-05
3	-12	0,10825	0,0282	1,1339	0,00015	794,6313	794,6313	802,2602	786,4156	798,4457	1,3559	6,619	0,00031	1,99186	1	1	0,00013
4	-11	0,10622	0,0237	1,1126	0,00034	802,2602	802,2602	811,3233	793,5945	806,7917	1,355	6,633	0,00068	2,04851	1	1	0,000436
5	-10	0,10436	0,0196	1,0932	0,00064	811,3233	811,3233	822,6425	802,0889	816,9829	1,354	6,6491	0,00128	2,10736	1,0001	1	0,001112
6	-9	0,10268	0,0159	1,0755	0,00109	822,6425	822,6425	837,2025	812,658	829,9225	1,3528	6,6683	0,00217	2,17026	1,0001	1,0001	0,00239
7	-8	0,10117	0,0126	1,0597	0,00171	837,2025	837,2025	856,1305	826,2105	846,6665	1,3513	6,6924	0,00342	2,23956	1,0002	1,0002	0,004562
8	-7	0,09984	0,0096	1,0457	0,00254	856,1305	856,1305	880,6642	843,7852	868,3973	1,3495	6,7227	0,00507	2,31807	1,0004	1,0003	0,007979
9	-6	0,09868	0,0071	1,0336	0,0036	880,6642	880,6642	912,1048	866,5205	896,3845	1,3472	6,7608	0,00719	2,40895	1,0007	1,0005	0,013052
10	-5	0,0977	0,0049	1,0234	0,00491	912,1048	912,1048	951,7581	895,6096	931,9314	1,3444	6,8078	0,00981	2,51557	1,001	1,0008	0,020243
11	-4	0,0969	0,0031	1,015	0,00649	951,7581	951,7581	1000,864	932,244	976,3112	1,341	6,8645	0,01297	2,64127	1,0015	1,0013	0,030057
12	-3	0,09627	0,0018	1,0084	0,00834	1000,864	1000,864	1060,521	977,5451	1030,693	1,3372	6,9309	0,01667	2,78918	1,0022	1,0018	0,043028
13	-2	0,09583	0,0008	1,0037	0,01045	1060,521	1060,521	1131,605	1032,491	1096,063	1,333	7,0063	0,0209	2,96188	1,003	1,0026	0,059699
14	-1	0,09556	0,0002	1,0009	0,0128	1131,605	1131,605	1214,691	1097,839	1173,148	1,3284	7,0893	0,0256	3,16114	1,0041	1,0035	0,080597
15	0	0,09547	0	1	0,01535	1214,691	1214,691	1309,976	1174,05	1262,333	1,3237	7,1777	0,03071	3,38769	1,0053	1,0047	0,106202
16	1	0,09556	0,0002	1,0009	0,01804	1309,976	1309,976	1417,207	1261,216	1363,591	1,319	7,2694	0,03607	3,64093	1,0069	1,0061	0,136907
17	2	0,09583	0,0008	1,0037	0,02077	1417,207	1417,207	1535,623	1359,001	1476,415	1,3144	7,3616	0,04154	3,91877	1,0087	1,0078	0,17298
18	3	0,09627	0,0018	1,0084	0,02345	1535,623	1535,623	1663,907	1466,583	1599,765	1,31	7,4521	0,04689	4,21754	1,0108	1,0097	0,21452
19	4	0,0969	0,0031	1,015	0,02594	1663,907	1663,907	1800,172	1582,634	1732,039	1,3059	7,5388	0,05189	4,53189	1,0131	1,012	0,261413
20	5	0,0977	0,0049	1,0234	0,02813	1800,172	1800,172	1941,979	1705,307	1871,075	1,3021	7,6201	0,05626	4,85495	1,0157	1,0144	0,313302
21	6	0,09868	0,0071	1,0336	0,02987	1941,979	1941,979	2086,405	1832,28	2014,192	1,2987	7,6946	0,05974	5,17847	1,0186	1,0172	0,369562
22	7	0,09984	0,0096	1,0457	0,03103	2086,405	2086,405	2230,159	1960,831	2158,282	1,2958	7,7617	0,06206	5,49327	1,0216	1,0201	0,429298
23	8	0,10117	0,0126	1,0597	0,03152	2230,159	2230,159	2369,757	2087,959	2299,958	1,2932	7,8208	0,06304	5,78965	1,0247	1,0231	0,491361

24	9	0,10268	0,0159	1,0755	0,03126	2369,757	2369,757	2501,728	2210,559	2435,742	1,291	7,8718	0,06252	6,05807	1,0279	1,0263	0,554397
25	10	0,10436	0,0196	1,0932	0,03024	2501,728	2501,728	2622,858	2325,609	2562,293	1,2892	7,915	0,06048	6,28979	1,031	1,0294	0,616919
26	11	0,10622	0,0237	1,1126	0,02849	2622,858	2622,858	2730,424	2430,384	2676,641	1,2877	7,9506	0,05697	6,47755	1,034	1,0325	0,677395
27	12	0,10825	0,0282	1,1339	0,0261	2730,424	2730,424	2822,406	2522,654	2776,415	1,2866	7,9792	0,05219	6,61615	1,0369	1,0355	0,734369
28	13	0,11046	0,0331	1,157	0,02321	2822,406	2822,406	2897,627	2600,842	2860,016	1,2857	8,0014	0,04642	6,70282	1,0395	1,0382	0,786563
29	14	0,11283	0,0383	1,1819	0,02001	2897,627	2897,627	2955,825	2664,133	2926,726	1,285	8,018	0,04001	6,73744	1,0419	1,0407	0,832984
30	15	0,11538	0,0439	1,2085	0,01668	2955,825	2955,825	2997,61	2712,494	2976,717	1,2845	8,0296	0,03336	6,72241	1,0439	1,0429	0,872994
31	16	0,11809	0,0499	1,237	0,01342	2997,61	2997,61	3024,341	2746,628	3010,976	1,2842	8,0372	0,02685	6,66232	1,0456	1,0447	0,906351
32	17	0,12097	0,0562	1,2671	0,01041	3024,341	3024,341	3037,93	2767,845	3031,136	1,284	8,0413	0,02081	6,56336	1,0469	1,0462	0,933198
33	18	0,12402	0,063	1,2991	0,00775	3037,93	3037,93	3040,595	2777,884	3039,262	1,284	8,0428	0,01551	6,43265	1,048	1,0474	0,954011
34	19	0,12723	0,07	1,3327	0,00554	3040,595	3040,595	3034,626	2778,705	3037,61	1,284	8,0421	0,01108	6,27757	1,0487	1,0483	0,96952
35	20	0,13061	0,0775	1,3681	0,00379	3034,626	3034,626	3022,176	2772,291	3028,401	1,2841	8,04	0,00758	6,10512	1,0493	1,049	0,980603
36	21	0,13414	0,0853	1,4051	0,00247	3022,176	3022,176	3005,117	2760,481	3013,647	1,2842	8,0367	0,00494	5,9215	1,0497	1,0495	0,988178
37	22	0,13784	0,0934	1,4438	0,00153	3005,117	3005,117	2984,963	2744,854	2995,04	1,2844	8,0327	0,00307	5,73182	1,0499	1,0498	0,993119
38	23	0,14169	0,1019	1,4842	0,0009	2984,963	2984,963	2962,857	2726,677	2973,91	1,2846	8,0281	0,00181	5,54006	1,0501	1,05	0,996186
39	24	0,1457	0,1108	1,5262	0,0005	2962,857	2962,857	2939,61	2706,896	2951,233	1,2848	8,0232	0,00101	5,34914	1,0502	1,0501	0,997993
40	25	0,14987	0,12	1,5698	0,00026	2939,61	2939,61	2915,765	2686,18	2927,688	1,285	8,0181	0,00053	5,16107	1,0502	1,0502	0,999

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ	θ				
20	50	1	10,5	1,052432282	1,469764	725,5265	1,038792	0,86	46,17984	0,036466	0,293	3					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	Dx1-2	P	m	m1-2	X
0	-20	0,13535	0,07749	1,36807	0,00000	725,5265	725,5265	743,922	725,5265	734,7242			0,00000	1,46976	1	1	0
1	-19	0,13185	0,07005	1,33271	0,00001	743,922	743,922	750,8951	732,5139	747,4085	1,36339	6,50369	0,00002	1,52328	1	1	1E-06
2	-18	0,12852	0,06296	1,29907	0,00004	750,8951	750,8951	758,056	739,537	754,4755	1,36162	6,53067	0,00007	1,57772	1	1	2E-05
3	-17	0,12536	0,05624	1,26715	0,00010	758,056	758,056	765,6327	746,786	761,8443	1,36066	6,54545	0,00019	1,63332	1	1	9E-05
4	-16	0,12238	0,04989	1,23696	0,00020	765,6327	765,6327	773,9218	754,5123	769,7772	1,35967	6,56068	0,00041	1,69050	1	1	0,0003
5	-15	0,11956	0,04390	1,20853	0,00037	773,9218	773,9218	783,2864	763,0423	778,6041	1,35862	6,57687	0,00074	1,74986	1	1	0,0007
6	-14	0,11693	0,03829	1,18187	0,00061	783,2864	783,2864	794,1516	772,7746	788,719	1,35748	6,59465	0,00122	1,81220	1,0001	1,0001	0,0014
7	-13	0,11446	0,03305	1,15699	0,00093	794,1516	794,1516	806,9993	784,1762	800,5755	1,35621	6,61470	0,00187	1,87858	1,0001	1,0001	0,0027

8	-12	0,11218	0,02819	1,13391	0,00135	806,9993	806,9993	822,3585	797,7751	814,6789	1,35475	6,63777	0,00271	1,95022	1,0002	1,0002	0,0045
9	-11	0,11007	0,02371	1,11263	0,00188	822,3585	822,3585	840,7946	814,1508	831,5765	1,35307	6,66460	0,00377	2,02855	1,0004	1,0003	0,0072
10	-10	0,10815	0,01961	1,09316	0,00253	840,7946	840,7946	862,8942	833,9215	851,8444	1,35113	6,69590	0,00506	2,11516	1,0006	1,0005	0,011
11	-9	0,10640	0,01590	1,07552	0,00330	862,8942	862,8942	889,2479	857,7274	876,071	1,34890	6,73224	0,00661	2,21172	1,0008	1,0007	0,0161
12	-8	0,10484	0,01257	1,05971	0,00421	889,2479	889,2479	920,4298	886,2112	904,8388	1,34638	6,77407	0,00842	2,31994	1,0011	1,001	0,0227
13	-7	0,10346	0,00963	1,04574	0,00525	920,4298	920,4298	956,9759	919,9948	938,7028	1,34355	6,82158	0,01050	2,44147	1,0016	1,0014	0,0311
14	-6	0,10226	0,00708	1,03363	0,00642	956,9759	956,9759	999,3608	959,6553	978,1683	1,34044	6,87470	0,01285	2,57781	1,0021	1,0018	0,0416
15	-5	0,10124	0,00492	1,02336	0,00773	999,3608	999,3608	1047,975	1005,699	1023,668	1,33709	6,93310	0,01546	2,73019	1,0028	1,0024	0,0544
16	-4	0,10041	0,00315	1,01496	0,00915	1047,975	1047,975	1103,101	1058,534	1075,538	1,33355	6,99615	0,01831	2,89949	1,0035	1,0031	0,0699
17	-3	0,09977	0,00177	1,00842	0,01068	1103,101	1103,101	1164,892	1118,447	1133,997	1,32987	7,06299	0,02137	3,08610	1,0045	1,004	0,0882
18	-2	0,09930	0,00079	1,00374	0,01230	1164,892	1164,892	1233,354	1185,579	1199,123	1,32613	7,13258	0,02460	3,28986	1,0055	1,005	0,1095
19	-1	0,09903	0,00020	1,00094	0,01397	1233,354	1233,354	1308,324	1259,902	1270,839	1,32238	7,20379	0,02794	3,50996	1,0068	1,0062	0,1341
20	0	0,09893	0,00000	1,00000	0,01567	1308,324	1308,324	1389,459	1341,206	1348,891	1,31870	7,27543	0,03133	3,74489	1,0082	1,0075	0,1621
21	1	0,09903	0,00020	1,00094	0,01735	1389,459	1389,459	1476,226	1429,077	1432,842	1,31514	7,34637	0,03469	3,99245	1,0098	1,009	0,1934
22	2	0,09930	0,00079	1,00374	0,01896	1476,226	1476,226	1567,896	1522,897	1522,061	1,31174	7,41557	0,03793	4,24969	1,0115	1,0107	0,2281
23	3	0,09977	0,00177	1,00842	0,02047	1567,896	1567,896	1663,55	1621,835	1615,723	1,30854	7,48213	0,04094	4,51298	1,0135	1,0125	0,266
24	4	0,10041	0,00315	1,01496	0,02182	1663,55	1663,55	1762,091	1724,859	1712,821	1,30556	7,54530	0,04364	4,77812	1,0155	1,0145	0,307
25	5	0,10124	0,00492	1,02336	0,02296	1762,091	1762,091	1862,262	1830,749	1812,177	1,30282	7,60450	0,04592	5,04041	1,0177	1,0166	0,3506
26	6	0,10226	0,00708	1,03363	0,02384	1862,262	1862,262	1962,683	1938,124	1912,473	1,30033	7,65931	0,04768	5,29482	1,0201	1,0189	0,3965
27	7	0,10346	0,00963	1,04574	0,02442	1962,683	1962,683	2061,89	2045,482	2012,286	1,29809	7,70945	0,04884	5,53619	1,0225	1,0213	0,4442
28	8	0,10484	0,01257	1,05971	0,02467	2061,89	2061,89	2158,385	2151,244	2110,137	1,29609	7,75477	0,04933	5,75944	1,0249	1,0237	0,4931
29	9	0,10640	0,01590	1,07552	0,02456	2158,385	2158,385	2250,695	2253,811	2204,54	1,29432	7,79523	0,04911	5,95977	1,0274	1,0262	0,5424
30	10	0,10815	0,01961	1,09316	0,02408	2250,695	2250,695	2337,432	2351,627	2294,064	1,29279	7,83091	0,04817	6,13292	1,0299	1,0287	0,5915
31	11	0,11007	0,02371	1,11263	0,02326	2337,432	2337,432	2417,351	2443,241	2377,392	1,29146	7,86193	0,04652	6,27534	1,0324	1,0311	0,6397
32	12	0,11218	0,02819	1,13391	0,02210	2417,351	2417,351	2489,405	2527,369	2453,378	1,29034	7,88848	0,04420	6,38438	1,0347	1,0335	0,6862
33	13	0,11446	0,03305	1,15699	0,02065	2489,405	2489,405	2552,794	2602,949	2521,1	1,28940	7,91083	0,04130	6,45841	1,0369	1,0358	0,7304
34	14	0,11693	0,03829	1,18187	0,01896	2552,794	2552,794	2606,992	2669,189	2579,893	1,28863	7,92925	0,03791	6,49688	1,039	1,038	0,7717
35	15	0,11956	0,04390	1,20853	0,01709	2606,992	2606,992	2651,769	2725,589	2629,381	1,28802	7,94405	0,03418	6,50033	1,041	1,04	0,8096
36	16	0,12238	0,04989	1,23696	0,01511	2651,769	2651,769	2687,186	2771,963	2669,478	1,28754	7,95558	0,03023	6,47031	1,0427	1,0418	0,8438
37	17	0,12536	0,05624	1,26715	0,01310	2687,186	2687,186	2713,574	2808,427	2700,38	1,28718	7,96416	0,02621	6,40928	1,0442	1,0434	0,874
38	18	0,12852	0,06296	1,29907	0,01113	2713,574	2713,574	2731,505	2835,377	2722,539	1,28694	7,97013	0,02226	6,32042	1,0455	1,0449	0,9002
39	19	0,13185	0,07005	1,33271	0,00925	2731,505	2731,505	2741,734	2853,452	2736,619	1,28679	7,97384	0,01850	6,20740	1,0467	1,0461	0,9225
40	20	0,13535	0,07749	1,36807	0,00751	2741,734	2741,734	2745,152	2863,476	2743,443	1,28671	7,97561	0,01503	6,07421	1,0476	1,0471	0,941

41	21	0,13901	0,08529	1,40511	0,00596	2745,152	2745,152	2742,717	2866,405	2743,934	1,286708	7,97573	0,01193	5,92492	1,0484	1,048	0,956
42	22	0,14284	0,09344	1,44382	0,00462	2742,717	2742,717	2735,404	2863,258	2739,061	1,28676	7,97448	0,00924	5,76347	1,049	1,0487	0,9679
43	23	0,14683	0,10194	1,48419	0,00349	2735,404	2735,404	2724,151	2855,064	2729,778	1,286857	7,97212	0,00697	5,59352	1,0494	1,0492	0,9771
44	24	0,15099	0,11078	1,52619	0,00256	2724,151	2724,151	2709,819	2842,808	2716,985	1,28699	7,96887	0,00512	5,41835	1,0498	1,0496	0,9841
45	25	0,15530	0,11996	1,56981	0,00183	2709,819	2709,819	2693,168	2827,389	2701,493	1,287153	7,96492	0,00366	5,24077	1,05	1,0499	0,9892
46	26	0,15978	0,12948	1,61501	0,00127	2693,168	2693,168	2674,837	2809,6	2684,002	1,287339	7,96043	0,00255	5,06310	1,0502	1,0501	0,9929
47	27	0,16440	0,13932	1,66178	0,00086	2674,837	2674,837	2655,352	2790,106	2665,095	1,287541	7,95553	0,00172	4,88718	1,0504	1,0503	0,9955
48	28	0,16918	0,14950	1,71010	0,00056	2655,352	2655,352	2635,12	2769,448	2645,236	1,287756	7,95033	0,00112	4,71441	1,0504	1,0504	0,9972
49	29	0,17412	0,15999	1,75995	0,00035	2635,12	2635,12	2614,454	2748,051	2624,787	1,287981	7,94491	0,00071	4,54581	1,0505	1,0505	0,9983
50	30	0,17920	0,17080	1,81129	0,00022	2614,454	2614,454	2593,579	2726,233	2604,016	1,288212	7,93933	0,00043	4,38208	1,0505	1,0505	0,999

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ	θ				
30	60	1	10,5	1,0524	0,9645	648,8373	1,0693	0,96	50,2074	0,0339	0,2930	3,4	30				
Расчёт процесса сгорания																	
f	f_1	$V_{ст}$	s	$\gamma(f_1)$	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X
0	-30	0,1845	0,1708	1,8113	5,2E-08	648,8373	648,8373	667,0646	648,8373	657,951			1,04E-07	0,96449	1	1	0
1	-29	0,1792	0,16	1,7599	1E-06	667,0646	667,0646	674,2125	655,8916	670,6386	1,37557	6,32518	2,08E-06	1,00341	1	1	1,04E-07
2	-28	0,1741	0,1495	1,7101	5,4E-06	674,2125	674,2125	681,4641	663,0046	677,8383	1,37337	6,35664	1,08E-05	1,04386	1	1	2,19E-06
3	-27	0,1692	0,1393	1,6618	1,7E-05	681,4641	681,4641	688,8796	670,2318	685,1719	1,37215	6,37413	3,32E-05	1,08592	1	1	1,3E-05
4	-26	0,1645	0,1295	1,615	3,9E-05	688,8796	688,8796	696,547	677,6366	692,7133	1,37094	6,39169	7,71E-05	1,12972	1	1	4,62E-05
5	-25	0,1599	0,12	1,5698	7,6E-05	696,547	696,547	704,5849	685,3119	700,5659	1,36972	6,40949	0,000152	1,17542	1,00001	1	0,000123
6	-24	0,1554	0,1108	1,5262	0,00013	704,5849	704,5849	713,1443	693,3829	708,8646	1,36848	6,42774	0,000267	1,22325	1,00001	1,00001	0,000275
7	-23	0,1511	0,1019	1,4842	0,00022	713,1443	713,1443	722,41	702,0083	717,7772	1,36719	6,44674	0,000433	1,27353	1,00003	1,00002	0,000542
8	-22	0,147	0,0934	1,4438	0,00033	722,41	722,41	732,601	711,3824	727,5055	1,36584	6,46681	0,000661	1,32664	1,00005	1,00004	0,000975
9	-21	0,1431	0,0853	1,4051	0,00048	732,601	732,601	743,9706	721,7353	738,2858	1,36441	6,48834	0,000964	1,38307	1,00008	1,00007	0,001636
10	-20	0,1393	0,0775	1,3681	0,00068	743,9706	743,9706	756,8051	733,3328	750,3879	1,36286	6,51175	0,001352	1,44341	1,00013	1,00011	0,0026
11	-19	0,1357	0,07	1,3327	0,00092	756,8051	756,8051	771,4224	746,4756	764,1138	1,36118	6,53747	0,001838	1,50834	1,0002	1,00017	0,003951
12	-18	0,1323	0,063	1,2991	0,00122	771,4224	771,4224	788,1677	761,497	779,795	1,35933	6,56595	0,002434	1,57867	1,00029	1,00025	0,005789
13	-17	0,129	0,0562	1,2671	0,00158	788,1677	788,1677	807,4102	778,7589	797,789	1,35729	6,59763	0,003152	1,65531	1,00042	1,00036	0,008223
14	-16	0,126	0,0499	1,237	0,002	807,4102	807,4102	829,5362	798,6479	818,4732	1,35506	6,63288	0,004004	1,73925	1,00058	1,0005	0,011375

15	-15	0,1231	0,0439	1,2085	0,0025	829,5362	829,5362	854,9423	821,5682	842,2392	1,35261	6,67202	0,004999	1,83159	1,00078	1,00068	0,015379
16	-14	0,1204	0,0383	1,1819	0,00307	854,9423	854,9423	884,0268	847,934	869,4845	1,34994	6,71527	0,006146	1,93345	1,00103	1,00091	0,020378
17	-13	0,1178	0,0331	1,157	0,00373	884,0268	884,0268	917,1806	878,1608	900,6037	1,34706	6,76271	0,007454	2,04601	1,00135	1,00119	0,026524
18	-12	0,1155	0,0282	1,1339	0,00446	917,1806	917,1806	954,7759	912,655	935,9783	1,34398	6,81428	0,008927	2,17042	1,00172	1,00153	0,033978
19	-11	0,1133	0,0237	1,1126	0,00528	954,7759	954,7759	997,1559	951,8026	975,9659	1,34073	6,86979	0,010568	2,30777	1,00218	1,00195	0,042906
20	-10	0,1113	0,0196	1,0932	0,00619	997,1559	997,1559	1044,623	995,9577	1020,889	1,33733	6,92886	0,012375	2,45904	1,00271	1,00244	0,053474
21	-9	0,1095	0,0159	1,0755	0,00717	1044,623	1044,623	1097,424	1045,43	1071,023	1,33383	6,99101	0,014342	2,62505	1,00334	1,00303	0,065848
22	-8	0,1079	0,0126	1,0597	0,00823	1097,424	1097,424	1155,745	1100,471	1126,585	1,33027	7,0556	0,01646	2,80637	1,00407	1,0037	0,08019
23	-7	0,1065	0,0096	1,0457	0,00936	1155,745	1155,745	1219,69	1161,263	1187,717	1,32669	7,12194	0,018714	3,00328	1,0049	1,00448	0,096651
24	-6	0,1053	0,0071	1,0336	0,01054	1219,69	1219,69	1289,275	1227,905	1254,482	1,32314	7,18926	0,021081	3,21572	1,00585	1,00538	0,115364
25	-5	0,1042	0,0049	1,0234	0,01177	1289,275	1289,275	1364,415	1300,401	1326,845	1,31965	7,2568	0,023535	3,44319	1,00692	1,00639	0,136445
26	-4	0,1034	0,0031	1,015	0,01302	1364,415	1364,415	1444,913	1378,649	1404,664	1,31627	7,3238	0,026041	3,68474	1,00811	1,00752	0,159979
27	-3	0,1027	0,0018	1,0084	0,01428	1444,913	1444,913	1530,452	1462,428	1487,682	1,31301	7,38957	0,028559	3,93892	1,00943	1,00877	0,18602
28	-2	0,1022	0,0008	1,0037	0,01552	1530,452	1530,452	1620,588	1551,391	1575,52	1,30991	7,45346	0,031043	4,20375	1,01088	1,01016	0,21458
29	-1	0,1019	0,0002	1,0009	0,01672	1620,588	1620,588	1714,748	1645,059	1667,668	1,30699	7,51495	0,033441	4,47674	1,01246	1,01167	0,245623
30	0	0,1018	0	1	0,01785	1714,748	1714,748	1812,229	1742,82	1763,489	1,30425	7,57356	0,035697	4,75489	1,01415	1,0133	0,279064
31	1	0,1019	0,0002	1,0009	0,01888	1812,229	1812,229	1912,204	1843,926	1862,216	1,30171	7,62895	0,037752	5,03473	1,01596	1,01506	0,314761
32	2	0,1022	0,0008	1,0037	0,01977	1912,204	1912,204	2013,732	1947,505	1962,968	1,29936	7,68084	0,039546	5,31241	1,01788	1,01692	0,352513
33	3	0,1027	0,0018	1,0084	0,02051	2013,732	2013,732	2115,778	2052,568	2064,755	1,29722	7,72906	0,041021	5,58379	1,01988	1,01888	0,392059
34	4	0,1034	0,0031	1,015	0,02106	2115,778	2115,778	2217,229	2158,032	2166,503	1,29527	7,77349	0,042122	5,84456	1,02196	1,02092	0,43308
35	5	0,1042	0,0049	1,0234	0,0214	2217,229	2217,229	2316,927	2262,74	2267,078	1,29351	7,81408	0,042804	6,09036	1,0241	1,02303	0,475202
36	6	0,1053	0,0071	1,0336	0,02151	2316,927	2316,927	2413,7	2365,491	2365,314	1,29193	7,85086	0,043027	6,31697	1,02627	1,02519	0,518006
37	7	0,1065	0,0096	1,0457	0,02138	2413,7	2413,7	2506,394	2465,076	2460,047	1,29053	7,88387	0,042768	6,52043	1,02845	1,02736	0,561033
38	8	0,1079	0,0126	1,0597	0,02101	2506,394	2506,394	2593,918	2560,312	2550,156	1,2893	7,91321	0,042015	6,69724	1,03062	1,02954	0,6038
39	9	0,1095	0,0159	1,0755	0,02039	2593,918	2593,918	2675,274	2650,084	2634,596	1,28823	7,93902	0,040776	6,84444	1,03275	1,03169	0,645815
40	10	0,1113	0,0196	1,0932	0,01954	2675,274	2675,274	2749,598	2733,382	2712,436	1,2873	7,96145	0,039074	6,95978	1,03482	1,03379	0,686592
41	11	0,1133	0,0237	1,1126	0,01848	2749,598	2749,598	2816,191	2809,334	2782,895	1,28651	7,98067	0,036951	7,04179	1,0368	1,03581	0,725666
42	12	0,1155	0,0282	1,1339	0,01723	2816,191	2816,191	2874,539	2877,243	2845,365	1,28584	7,99689	0,034465	7,08982	1,03868	1,03774	0,762617
43	13	0,1178	0,0331	1,157	0,01584	2874,539	2874,539	2924,337	2936,607	2899,438	1,28529	8,01031	0,031685	7,10409	1,04042	1,03955	0,797082
44	14	0,1204	0,0383	1,1819	0,01435	2924,337	2924,337	2965,488	2987,133	2944,913	1,28485	8,02115	0,028695	7,08561	1,04203	1,04123	0,828767
45	15	0,1231	0,0439	1,2085	0,01279	2965,488	2965,488	2998,106	3028,749	2981,797	1,28451	8,02962	0,025582	7,03617	1,04349	1,04276	0,857462
46	16	0,126	0,0499	1,237	0,01122	2998,106	2998,106	3022,497	3061,592	3010,301	1,28425	8,03596	0,022436	6,95818	1,04478	1,04414	0,883044
47	17	0,129	0,0562	1,2671	0,00967	3022,497	3022,497	3039,138	3085,996	3030,818	1,28407	8,0404	0,019343	6,85456	1,04592	1,04535	0,90548

48	18	0,1323	0,063	1,2991	0,00819	3039,138	3039,138	3048,647	3102,466	3043,893	1,28396	8,04314	0,016381	6,72862	1,0469	1,04641	0,924823
49	19	0,1357	0,07	1,3327	0,00681	3048,647	3048,647	3051,744	3111,65	3050,195	1,28391	8,0444	0,013616	6,58386	1,04773	1,04732	0,941203
50	20	0,1393	0,0775	1,3681	0,00555	3051,744	3051,744	3049,212	3114,295	3050,478	1,28391	8,04439	0,011101	6,42384	1,04842	1,04808	0,95482
51	21	0,1431	0,0853	1,4051	0,00443	3049,212	3049,212	3041,862	3111,212	3045,537	1,28396	8,04329	0,008868	6,25203	1,04899	1,04871	0,96592
52	22	0,147	0,0934	1,4438	0,00347	3041,862	3041,862	3030,49	3103,232	3036,176	1,28404	8,04128	0,006936	6,07171	1,04944	1,04921	0,974789
53	23	0,1511	0,1019	1,4842	0,00265	3030,49	3030,49	3015,853	3091,177	3023,172	1,28415	8,03851	0,005307	5,88587	1,04979	1,04961	0,981725
54	24	0,1554	0,1108	1,5262	0,00198	3015,853	3015,853	2998,644	3075,821	3007,249	1,28429	8,03513	0,003969	5,69715	1,05006	1,04992	0,987032
55	25	0,1599	0,12	1,5698	0,00145	2998,644	2998,644	2979,471	3057,87	2989,057	1,28444	8,03125	0,002898	5,50777	1,05026	1,05016	0,991001
56	26	0,1645	0,1295	1,615	0,00103	2979,471	2979,471	2958,858	3037,948	2969,164	1,28462	8,02698	0,002064	5,31961	1,05041	1,05033	0,993899
57	27	0,1692	0,1393	1,6618	0,00072	2958,858	2958,858	2937,235	3016,587	2948,046	1,2848	8,02242	0,001433	5,13415	1,05051	1,05046	0,995963
58	28	0,1741	0,1495	1,7101	0,00048	2937,235	2937,235	2914,949	2994,227	2926,092	1,285	8,01762	0,000968	4,95251	1,05058	1,05055	0,997396
59	29	0,1792	0,16	1,7599	0,00032	2914,949	2914,949	2892,271	2971,22	2903,61	1,2852	8,01264	0,000636	4,77555	1,05063	1,05061	0,998364
60	30	0,1845	0,1708	1,8113	0,0002	2892,271	2892,271	2869,405	2947,84	2880,838	1,28541	8,00754	0,000406	4,60385	1,05066	1,05065	0,999

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ					
40	70	1	10,5	1,052	0,637	573,619	1,079	0,97	50,446	0,030	0,293	3,4					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f_1	$V_{ст}$	s	$y(f_1)$	X_{1-2}	$T_{пред}$	T_1	T_2	$T_{истина}$	T_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	DX_{1-2}	P	m	m_{1-2}	X
0	-40	0,2469	0,295	2,4014	2,6E-08	573,619	573,6193	581,04	573,619	577,33			5,26E-08	0,63711	1	1	0
1	-39	0,2402	0,2814	2,3365	5,3E-07	581,04	581,0398	587,5	579,813	584,269	1,39185	6,103954	1,06E-06	0,66187	1	1	5,26E-08
2	-38	0,2336	0,268	2,2729	2,8E-06	587,497	587,4975	594,1	586,117	590,798	1,39028	6,12459	5,5E-06	0,6878	1	1	1,11E-06
3	-37	0,2272	0,2548	2,2105	8,4E-06	594,098	594,0978	600,88	592,558	597,487	1,38882	6,143714	1,68E-05	0,71498	1	1	6,61E-06
4	-36	0,221	0,242	2,1494	2E-05	600,877	600,8767	607,89	599,173	604,381	1,38737	6,163021	3,91E-05	0,74352	1	1,000001	2,34E-05
5	-35	0,2148	0,2294	2,0896	3,8E-05	607,886	607,8856	615,19	606,016	611,539	1,38591	6,182621	7,7E-05	0,77353	1	1,000002	6,26E-05
6	-34	0,2088	0,2171	2,0311	6,8E-05	615,192	615,1922	622,88	613,156	619,037	1,38442	6,202663	0,000135	0,80517	1,00001	1,000005	0,00014
7	-33	0,2029	0,2051	1,9741	0,00011	622,882	622,8819	631,06	620,684	626,97	1,3829	6,223329	0,00022	0,83863	1,00001	1,000011	0,000275
8	-32	0,1972	0,1933	1,9184	0,00017	631,058	631,0583	639,84	628,708	635,451	1,38133	6,244836	0,000336	0,87414	1,00003	1,00002	0,000495
9	-31	0,1916	0,1819	1,8641	0,00024	639,844	639,8438	649,38	637,356	644,612	1,37969	6,267433	0,00049	0,91197	1,00004	1,000034	0,000831
10	-30	0,1862	0,1708	1,8113	0,00034	649,38	649,3801	659,83	646,775	654,604	1,37797	6,291394	0,000687	0,95245	1,00007	1,000055	0,00132
11	-29	0,1809	0,16	1,7599	0,00047	659,828	659,8276	671,37	657,135	665,597	1,37615	6,317015	0,000935	0,99597	1,0001	1,000085	0,002007

12	-28	0,1758	0,1495	1,7101	0,00062	671,366	671,3657	684,19	668,622	677,778	1,37421	6,3446	0,00124	1,04296	1,00015	1,000126	0,002942
13	-27	0,1708	0,1393	1,6618	0,0008	684,191	684,1913	698,52	681,443	691,354	1,37213	6,374455	0,001607	1,09393	1,00021	1,000181	0,004182
14	-26	0,166	0,1295	1,615	0,00102	698,517	698,5175	714,57	695,82	706,545	1,3699	6,406873	0,002045	1,14944	1,00029	1,000254	0,005789
15	-25	0,1614	0,12	1,5698	0,00128	714,572	714,5722	732,6	711,994	723,584	1,3675	6,442121	0,002559	1,21014	1,0004	1,000347	0,007835
16	-24	0,1569	0,1108	1,5262	0,00158	732,596	732,5956	752,84	730,213	742,716	1,36494	6,480425	0,003156	1,27672	1,00053	1,000464	0,010394
17	-23	0,1526	0,1019	1,4842	0,00192	752,837	752,8369	775,55	750,74	764,194	1,36219	6,521956	0,003841	1,34995	1,00069	1,000609	0,01355
18	-22	0,1484	0,0934	1,4438	0,00231	775,551	775,5513	801	773,841	788,274	1,35927	6,566813	0,004619	1,43065	1,00089	1,000788	0,017391
19	-21	0,1444	0,0853	1,4051	0,00275	800,996	800,9963	829,43	799,785	815,212	1,35619	6,615014	0,005495	1,51968	1,00112	1,001003	0,02201
20	-20	0,1406	0,0775	1,3681	0,00324	829,427	829,4269	861,09	828,839	845,259	1,35295	6,666486	0,006473	1,61795	1,0014	1,00126	0,027505
21	-19	0,137	0,07	1,3327	0,00378	861,091	861,0914	896,23	861,262	878,659	1,34959	6,721062	0,007556	1,72637	1,00173	1,001565	0,033978
22	-18	0,1335	0,063	1,2991	0,00437	896,226	896,2265	935,05	897,301	915,639	1,34611	6,778485	0,008743	1,84585	1,00211	1,001922	0,041534
23	-17	0,1303	0,0562	1,2671	0,00502	935,052	935,0516	977,76	937,185	956,408	1,34256	6,838408	0,010036	1,97728	1,00256	1,002337	0,050277
24	-16	0,1272	0,0499	1,237	0,00572	977,764	977,7641	1024,5	981,118	1001,15	1,33896	6,900411	0,011432	2,12149	1,00307	1,002815	0,060313
25	-15	0,1242	0,0439	1,2085	0,00646	1024,53	1024,533	1075,5	1029,28	1050,01	1,33534	6,964017	0,012926	2,27922	1,00365	1,003361	0,071745
26	-14	0,1215	0,0383	1,1819	0,00726	1075,49	1075,494	1130,7	1081,8	1103,12	1,33175	7,028708	0,014512	2,45108	1,00431	1,003981	0,084671
27	-13	0,1189	0,0331	1,157	0,00809	1130,74	1130,743	1190,3	1138,79	1160,54	1,32819	7,093943	0,016181	2,63751	1,00505	1,00468	0,099183
28	-12	0,1166	0,0282	1,1339	0,00896	1190,33	1190,33	1254,3	1200,29	1222,29	1,32472	7,159182	0,017921	2,83876	1,00587	1,005461	0,115364
29	-11	0,1144	0,0237	1,1126	0,00986	1254,25	1254,253	1322,5	1266,3	1288,35	1,32134	7,223902	0,019716	3,0548	1,00679	1,006329	0,133285
30	-10	0,1124	0,0196	1,0932	0,01078	1322,45	1322,453	1394,8	1336,76	1358,63	1,31809	7,287611	0,02155	3,28531	1,00779	1,007287	0,153001
31	-9	0,1106	0,0159	1,0755	0,0117	1394,81	1394,809	1471,1	1411,53	1432,97	1,31497	7,349859	0,023401	3,52966	1,00889	1,008338	0,174551
32	-8	0,1089	0,0126	1,0597	0,01262	1471,13	1471,13	1551,2	1490,42	1511,14	1,312	7,41025	0,025246	3,78682	1,01008	1,009482	0,197953
33	-7	0,1075	0,0096	1,0457	0,01353	1551,16	1551,157	1634,6	1573,15	1592,86	1,30919	7,468443	0,027058	4,05537	1,01136	1,01072	0,223198
34	-6	0,1063	0,0071	1,0336	0,0144	1634,55	1634,554	1720,9	1659,37	1677,73	1,30655	7,524158	0,028808	4,33349	1,01274	1,012051	0,250256
35	-5	0,1052	0,0049	1,0234	0,01523	1720,91	1720,91	1809,7	1748,66	1765,33	1,30408	7,57717	0,030466	4,61895	1,01421	1,013473	0,279064
36	-4	0,1043	0,0031	1,015	0,016	1809,74	1809,741	1900,5	1840,5	1855,11	1,30178	7,627311	0,032001	4,9091	1,01576	1,014982	0,309531
37	-3	0,1037	0,0018	1,0084	0,01669	1900,49	1900,489	1992,5	1934,32	1946,51	1,29965	7,674463	0,033379	5,20094	1,01739	1,016572	0,341531
38	-2	0,1032	0,0008	1,0037	0,01728	1992,53	1992,533	2085,2	2029,47	2038,86	1,29768	7,718551	0,034569	5,49117	1,01909	1,018237	0,37491
39	-1	0,1029	0,0002	1,0009	0,01777	2085,19	2085,189	2177,7	2125,24	2131,46	1,29588	7,759545	0,035541	5,77622	1,02085	1,019966	0,409479
40	0	0,1028	0	1	0,01813	2177,73	2177,729	2269,4	2220,89	2223,56	1,29423	7,797444	0,036266	6,05239	1,02266	1,021751	0,44502
41	1	0,1029	0,0002	1,0009	0,01836	2269,39	2269,386	2359,4	2315,61	2314,38	1,29273	7,832279	0,03672	6,31591	1,0245	1,023578	0,481286
42	2	0,1032	0,0008	1,0037	0,01844	2359,37	2359,374	2446,9	2408,6	2403,14	1,29137	7,864105	0,036885	6,56308	1,02637	1,025436	0,518006
43	3	0,1037	0,0018	1,0084	0,01837	2446,9	2446,901	2531,2	2499,05	2489,05	1,29015	7,892997	0,036746	6,79035	1,02825	1,02731	0,554891
44	4	0,1043	0,0031	1,015	0,01815	2531,19	2531,192	2611,5	2586,16	2571,35	1,28906	7,919047	0,036296	6,99448	1,03012	1,029184	0,591636

45	5	0,1052	0,0049	1,0234	0,01777	2611,5	2611,501	2687,1	2669,16	2649,32	1,28809	7,942357	0,035538	7,17261	1,03197	1,031043	0,627933
46	6	0,1063	0,0071	1,0336	0,01724	2687,14	2687,135	2757,5	2747,35	2722,3	1,28723	7,963044	0,034478	7,32237	1,03378	1,032872	0,66347
47	7	0,1075	0,0096	1,0457	0,01657	2757,47	2757,472	2822	2820,09	2789,72	1,28648	7,98123	0,033135	7,44197	1,03553	1,034654	0,697949
48	8	0,1089	0,0126	1,0597	0,01577	2821,97	2821,973	2880,2	2886,84	2851,09	1,28583	7,997045	0,031534	7,53022	1,03722	1,036375	0,731084
49	9	0,1106	0,0159	1,0755	0,01485	2880,2	2880,202	2931,8	2947,16	2906,02	1,28528	8,010624	0,029705	7,58659	1,03882	1,038021	0,762617
50	10	0,1124	0,0196	1,0932	0,01384	2931,83	2931,832	2976,7	3000,71	2954,24	1,28481	8,022104	0,027689	7,6112	1,04034	1,03958	0,792323
51	11	0,1144	0,0237	1,1126	0,01276	2976,65	2976,654	3014,6	3047,28	2995,62	1,28443	8,031628	0,025529	7,60478	1,04175	1,041041	0,820012
52	12	0,1166	0,0282	1,1339	0,01164	3014,58	3014,583	3045,7	3086,81	3030,12	1,28412	8,039336	0,023271	7,56867	1,04305	1,042395	0,84554
53	13	0,1189	0,0331	1,157	0,01048	3045,65	3045,655	3070	3119,31	3057,84	1,28387	8,04537	0,020964	7,50469	1,04423	1,043638	0,868811
54	14	0,1215	0,0383	1,1819	0,00933	3070,02	3070,02	3087,9	3144,96	3078,98	1,28369	8,049871	0,018656	7,4151	1,0453	1,044764	0,889775
55	15	0,1242	0,0439	1,2085	0,0082	3087,94	3087,935	3099,8	3164,02	3093,84	1,28357	8,052976	0,016392	7,3025	1,04625	1,045772	0,90843
56	16	0,1272	0,0499	1,237	0,00711	3099,75	3099,753	3105,9	3176,84	3102,83	1,28349	8,054822	0,014215	7,1697	1,04708	1,046664	0,924823
57	17	0,1303	0,0562	1,2671	0,00608	3105,9	3105,902	3106,9	3183,87	3106,39	1,28347	8,05554	0,01216	7,01963	1,04781	1,047443	0,939038
58	18	0,1335	0,063	1,2991	0,00513	3106,87	3106,87	3103,2	3185,6	3105,03	1,28348	8,055254	0,010256	6,85526	1,04842	1,048115	0,951198
59	19	0,137	0,07	1,3327	0,00426	3103,19	3103,187	3095,4	3182,58	3099,3	1,28352	8,054084	0,008524	6,67948	1,04895	1,048685	0,961454
60	20	0,1406	0,0775	1,3681	0,00349	3095,4	3095,404	3084,1	3175,37	3089,74	1,2836	8,052143	0,006977	6,49508	1,04938	1,049163	0,969977
61	21	0,1444	0,0853	1,4051	0,00281	3084,07	3084,073	3069,7	3164,52	3076,9	1,28371	8,049536	0,005622	6,30462	1,04974	1,049558	0,976954
62	22	0,1484	0,0934	1,4438	0,00223	3069,74	3069,736	3052,9	3150,58	3061,32	1,28383	8,04636	0,004456	6,11042	1,05002	1,049878	0,982576
63	23	0,1526	0,1019	1,4842	0,00174	3052,9	3052,904	3034,1	3134,09	3043,48	1,28398	8,042701	0,003473	5,91455	1,05025	1,050135	0,987032
64	24	0,1569	0,1108	1,5262	0,00133	3034,05	3034,053	3013,6	3115,51	3023,83	1,28415	8,038639	0,00266	5,71879	1,05043	1,050337	0,990506
65	25	0,1614	0,12	1,5698	0,001	3013,61	3013,61	2992	3095,29	3002,78	1,28432	8,034245	0,002001	5,52464	1,05056	1,050493	0,993166
66	26	0,166	0,1295	1,615	0,00074	2991,95	2991,952	2969,4	3073,81	2980,68	1,28451	8,029578	0,001477	5,33334	1,05066	1,050612	0,995167
67	27	0,1708	0,1393	1,6618	0,00053	2969,41	2969,405	2946,2	3051,39	2957,82	1,28471	8,024691	0,001069	5,14585	1,05074	1,0507	0,996644
68	28	0,1758	0,1495	1,7101	0,00038	2946,24	2946,243	2922,7	3028,32	2934,47	1,28492	8,019629	0,000759	4,96295	1,05079	1,050765	0,997714
69	29	0,1809	0,16	1,7599	0,00026	2922,69	2922,692	2898,9	3004,83	2910,81	1,28513	8,014428	0,000528	4,78519	1,05083	1,050811	0,998473
70	30	0,1862	0,1708	1,8113	0,00018	2898,93	2898,934	#ЗНАЧ!	2981,09	#ЗНАЧ!	1,28534	8,00912	0,000359	4,61297	1,05086	1,050844	0,999

Таблица А5 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ													
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ	
45	70	1	10,5	1,0524	0,5103	546,1115	1,1230	0,8	31,9977	0,0298	0,2933884	3	

Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m ₁₋₂	X
0	-45	0,2934	0,36705	2,7435	1,44E-07	546,11	546,11	551,82	546,11	548,97			2,88E-07	0,510323	1	1	0
1	-44	0,2859	0,3522	2,6729	2,16E-06	551,82	551,82	557,67	551,82	554,75	1,399	6,02	4,32E-06	0,529268	1	1	2,88E-07
2	-43	0,2784	0,33757	2,6035	9,35E-06	557,67	557,67	563,70	557,67	560,69	1,397	6,03	1,87E-05	0,549151	1	1	4,6E-06
3	-42	0,2711	0,32318	2,5351	2,52E-05	563,70	563,70	569,97	563,71	566,84	1,396	6,05	5,03E-05	0,570059	1,000001	1,000001	2,33E-05
4	-41	0,2639	0,30903	2,4679	5,31E-05	569,97	569,97	576,55	569,97	573,26	1,394	6,07	0,000106	0,592105	1,000004	1,000002	7,37E-05
5	-40	0,2569	0,29511	2,4018	9,65E-05	576,55	576,55	583,54	576,56	580,05	1,393	6,09	0,000193	0,615423	1,000009	1,000006	0,00018
6	-39	0,2499	0,28146	2,3369	0,000159	583,54	583,54	591,03	583,55	587,29	1,391	6,11	0,000318	0,640181	1,000019	1,000014	0,000373
7	-38	0,2431	0,26805	2,2733	0,000244	591,03	591,03	599,16	591,04	595,10	1,390	6,13	0,000487	0,666572	1,000035	1,000027	0,000691
8	-37	0,2364	0,25492	2,2108	0,000354	599,16	599,16	608,05	599,17	603,60	1,388	6,16	0,000708	0,694828	1,00006	1,000048	0,001178
9	-36	0,2299	0,24205	2,1497	0,000494	608,05	608,05	617,85	608,07	612,95	1,386	6,18	0,000987	0,725213	1,000096	1,000078	0,001886
10	-35	0,2235	0,22946	2,0899	0,000665	617,85	617,85	628,72	617,87	623,29	1,384	6,21	0,001331	0,758033	1,000146	1,000121	0,002873
11	-34	0,2173	0,21715	2,0314	0,000872	628,72	628,72	640,83	628,75	634,78	1,382	6,24	0,001745	0,79363	1,000214	1,00018	0,004204
12	-33	0,2112	0,20512	1,9743	0,001118	640,83	640,83	654,36	640,88	647,60	1,380	6,27	0,002235	0,832393	1,000303	1,000258	0,005948
13	-32	0,2052	0,1934	1,9186	0,001404	654,36	654,36	669,49	654,42	661,93	1,377	6,30	0,002808	0,874749	1,000417	1,00036	0,008184
14	-31	0,1994	0,18197	1,8644	0,001734	669,49	669,49	686,41	669,57	677,95	1,375	6,34	0,003468	0,921171	1,00056	1,000488	0,010992
15	-30	0,1937	0,17085	1,8115	0,00211	686,41	686,41	705,30	686,50	695,85	1,372	6,38	0,004219	0,972171	1,000736	1,000648	0,01446
16	-29	0,1882	0,16004	1,7602	0,002532	705,30	705,30	726,34	705,41	715,82	1,369	6,42	0,005065	1,028302	1,000951	1,000844	0,018679
17	-28	0,1829	0,14954	1,7103	0,003004	726,34	726,34	749,72	726,49	738,03	1,366	6,46	0,006008	1,09015	1,001209	1,00108	0,023744
18	-27	0,1777	0,13936	1,662	0,003525	749,72	749,72	775,59	749,90	762,65	1,363	6,51	0,007049	1,158334	1,001515	1,001362	0,029751
19	-26	0,1727	0,12951	1,6152	0,004095	775,59	775,59	804,12	775,82	789,85	1,359	6,56	0,00819	1,233493	1,001874	1,001694	0,036801
20	-25	0,1679	0,11999	1,57	0,004714	804,12	804,12	835,44	804,40	819,78	1,356	6,62	0,009427	1,316281	1,002291	1,002082	0,044991
21	-24	0,1632	0,11081	1,5263	0,00538	835,44	835,44	869,66	835,78	852,55	1,352	6,68	0,010759	1,407353	1,002771	1,002531	0,054418
22	-23	0,1587	0,10197	1,4843	0,00609	869,66	869,66	906,89	870,09	888,27	1,349	6,74	0,012181	1,507352	1,003319	1,003045	0,065177
23	-22	0,1544	0,09346	1,444	0,006842	906,89	906,89	947,18	907,40	927,03	1,345	6,80	0,013684	1,616895	1,003939	1,003629	0,077358
24	-21	0,1503	0,08531	1,4052	0,00763	947,18	947,18	990,57	947,79	968,87	1,341	6,86	0,015261	1,736551	1,004636	1,004287	0,091042
25	-20	0,1463	0,07751	1,3682	0,008449	990,57	990,57	1037,06	991,30	1013,81	1,338	6,92	0,016899	1,866819	1,005413	1,005024	0,106303
26	-19	0,1425	0,07007	1,3328	0,009293	1037,06	1037,06	1086,61	1037,92	1061,84	1,334	6,98	0,018585	2,008109	1,006273	1,005843	0,123202
27	-18	0,1389	0,06298	1,2992	0,010152	1086,61	1086,61	1139,15	1087,61	1112,88	1,331	7,05	0,020303	2,160707	1,007219	1,006746	0,141787
28	-17	0,1355	0,05626	1,2672	0,011017	1139,15	1139,15	1194,55	1140,30	1166,85	1,327	7,11	0,022035	2,324757	1,008253	1,007736	0,16209
29	-16	0,1323	0,0499	1,237	0,01188	1194,55	1194,55	1252,65	1195,87	1223,60	1,324	7,17	0,023759	2,500222	1,009375	1,008814	0,184125
30	-15	0,1293	0,04392	1,2086	0,012727	1252,65	1252,65	1313,24	1254,15	1282,95	1,321	7,23	0,025454	2,68686	1,010585	1,00998	0,207884

31	-14	0,1264	0,0383	1,1819	0,013547	1313,24	1313,24	1376,05	1314,92	1344,65	1,318	7,28	0,027094	2,884195	1,011881	1,011233	0,233338
32	-13	0,1237	0,03306	1,157	0,014327	1376,05	1376,05	1440,79	1377,93	1408,42	1,315	7,34	0,028655	3,09149	1,013261	1,012571	0,260432
33	-12	0,1213	0,0282	1,1339	0,015055	1440,79	1440,79	1507,09	1442,86	1473,94	1,313	7,39	0,03011	3,30773	1,01472	1,01399	0,289087
34	-11	0,119	0,02372	1,1127	0,015716	1507,09	1507,09	1574,58	1509,37	1540,83	1,310	7,44	0,031432	3,5316	1,016253	1,015486	0,319197
35	-10	0,1169	0,01962	1,0932	0,016297	1574,58	1574,58	1642,80	1577,06	1608,69	1,308	7,49	0,032595	3,76149	1,017853	1,017053	0,350628
36	-9	0,115	0,0159	1,0755	0,016787	1642,80	1642,80	1711,31	1645,48	1677,06	1,306	7,54	0,033575	3,995491	1,019513	1,018683	0,383223
37	-8	0,1133	0,01257	1,0597	0,017174	1711,31	1711,31	1779,61	1714,19	1745,46	1,304	7,58	0,034348	4,231419	1,021222	1,020368	0,416798
38	-7	0,1118	0,00963	1,0458	0,017447	1779,61	1779,61	1847,20	1782,69	1813,41	1,302	7,62	0,034894	4,46684	1,022971	1,022097	0,451145
39	-6	0,1105	0,00708	1,0336	0,017598	1847,20	1847,20	1913,55	1850,46	1880,38	1,301	7,65	0,035196	4,699118	1,024748	1,02386	0,486039
40	-5	0,1094	0,00492	1,0234	0,017622	1913,55	1913,55	1978,15	1916,99	1945,85	1,299	7,69	0,035243	4,925473	1,02654	1,025644	0,521235
41	-4	0,1085	0,00315	1,015	0,017513	1978,15	1978,15	2040,51	1981,76	2009,33	1,298	7,72	0,035027	5,143048	1,028334	1,027437	0,556479
42	-3	0,1078	0,00177	1,0084	0,017273	2040,51	2040,51	2100,12	2044,26	2070,32	1,296	7,75	0,034545	5,348987	1,030118	1,029226	0,591505
43	-2	0,1073	0,00079	1,0037	0,016901	2100,12	2100,12	2156,56	2104,03	2128,34	1,295	7,77	0,033802	5,540523	1,031877	1,030997	0,626051
44	-1	0,107	0,0002	1,0009	0,016404	2156,56	2156,56	2209,41	2160,59	2182,99	1,294	7,79	0,032808	5,715064	1,033598	1,032737	0,659853
45	0	0,1069	0	1	0,015789	2209,41	2209,41	2258,33	2213,56	2233,87	1,293	7,81	0,031579	5,870273	1,035269	1,034433	0,692661
46	1	0,107	0,0002	1,0009	0,015068	2258,33	2258,33	2303,01	2262,58	2280,67	1,293	7,83	0,030135	6,00415	1,036876	1,036072	0,72424
47	2	0,1073	0,00079	1,0037	0,014252	2303,01	2303,01	2343,24	2307,35	2323,12	1,292	7,85	0,028504	6,115096	1,038411	1,037644	0,754375
48	3	0,1078	0,00177	1,0084	0,013359	2343,24	2343,24	2378,85	2347,65	2361,04	1,291	7,86	0,026717	6,201959	1,039862	1,039137	0,782879
49	4	0,1085	0,00315	1,015	0,012404	2378,85	2378,85	2409,76	2383,32	2394,30	1,291	7,87	0,024808	6,264067	1,041223	1,040542	0,809597
50	5	0,1094	0,00492	1,0234	0,011407	2409,76	2409,76	2435,95	2414,28	2422,85	1,291	7,88	0,022814	6,301239	1,042486	1,041854	0,834405
51	6	0,1105	0,00708	1,0336	0,010386	2435,95	2435,95	2457,49	2440,51	2446,72	1,290	7,89	0,020771	6,313773	1,043647	1,043067	0,857218
52	7	0,1118	0,00963	1,0458	0,009359	2457,49	2457,49	2474,49	2462,07	2465,99	1,290	7,90	0,018718	6,30242	1,044705	1,044176	0,87799
53	8	0,1133	0,01257	1,0597	0,008345	2474,49	2474,49	2487,13	2479,08	2480,81	1,290	7,90	0,016691	6,268338	1,045658	1,045182	0,896708
54	9	0,115	0,0159	1,0755	0,007361	2487,13	2487,13	2495,63	2491,72	2491,38	1,290	7,91	0,014721	6,213027	1,046508	1,046083	0,913399
55	10	0,1169	0,01962	1,0932	0,006419	2495,63	2495,63	2500,27	2500,22	2497,95	1,290	7,91	0,012839	6,138271	1,047257	1,046883	0,92812
56	11	0,119	0,02372	1,1127	0,005534	2500,27	2500,27	2501,35	2504,85	2500,81	1,289	7,91	0,011068	6,046054	1,047911	1,047584	0,940959
57	12	0,1213	0,0282	1,1339	0,004714	2501,35	2501,35	2499,18	2505,90	2500,27	1,289	7,91	0,009428	5,938491	1,048475	1,048193	0,952026
58	13	0,1237	0,03306	1,157	0,003966	2499,18	2499,18	2494,10	2503,70	2496,64	1,290	7,91	0,007933	5,817757	1,048955	1,048715	0,961454
59	14	0,1264	0,0383	1,1819	0,003295	2494,10	2494,10	2486,45	2498,59	2490,28	1,290	7,91	0,006591	5,686019	1,049359	1,049157	0,969387
60	15	0,1293	0,04392	1,2086	0,002702	2486,45	2486,45	2476,55	2490,89	2481,50	1,290	7,90	0,005405	5,545381	1,049694	1,049526	0,975978
61	16	0,1323	0,0499	1,237	0,002186	2476,552	2476,552	2464,722	2480,95	2470,637	1,290	7,90	0,004373	5,397839	1,049969	1,049832	0,981382
62	17	0,1355	0,05626	1,2672	0,001745	2464,72	2464,72	2451,26	2469,07	2457,99	1,290	7,90	0,003489	5,245245	1,050192	1,050081	0,985755
63	18	0,1389	0,06298	1,2992	0,001373	2451,26	2451,26	2436,44	2455,55	2443,85	1,290	7,89	0,002745	5,089282	1,05037	1,050281	0,989245

64	19	0,1425	0,07007	1,3328	0,001064	2436,44	2436,44	2420,50	2440,67	2428,47	1,290	7,89	0,002128	4,931453	1,05051	1,05044	0,99199
65	20	0,1463	0,07751	1,3682	0,000813	2420,50	2420,50	2403,68	2424,67	2412,09	1,291	7,88	0,001625	4,773072	1,050618	1,050564	0,994118
66	21	0,1503	0,08531	1,4052	0,000611	2403,68	2403,68	2386,15	2407,79	2394,92	1,291	7,88	0,001222	4,615269	1,050701	1,050659	0,995743
67	22	0,1544	0,09346	1,444	0,000452	2386,15	2386,15	2368,10	2390,20	2377,13	1,291	7,87	0,000905	4,458998	1,050763	1,050732	0,996966
68	23	0,1587	0,10197	1,4843	0,000329	2368,10	2368,10	2349,67	2372,09	2358,89	1,291	7,87	0,000659	4,305046	1,050809	1,050786	0,99787
69	24	0,1632	0,11081	1,5263	0,000236	2349,67	2349,67	2330,97	2353,59	2340,32	1,292	7,86	0,000472	4,154055	1,050843	1,050826	0,998529
70	25	0,1679	0,11999	1,57	0,000166	2330,97	2330,97	2312,10	2334,82	2321,53	1,292	7,85	0,000332	4,00653	1,050867	1,050855	0,999

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

Таблица Б1 - расчетные значения перемещения, скорости и ускорения поршня.

$\varphi_{кв}$, град	$\varphi_{кв}$, рад	S_X , мм	V_X , м/с	W_{X1} , м/с ²	W_{X2} , м/с ²	W_X , м/с ²
0	0	0	0	15001,8	4524,352	19526,2
10	0,1745	0,7501	5,377	14773,89	4251,5002	19025,4
20	0,3491	2,962	10,48	14097,08	3465,8547	17562,9
30	0,5236	6,5236	15,06	12991,94	2262,176	15254,1
40	0,6981	11,258	18,89	11492,04	785,64548	12277,7
50	0,8727	16,937	21,84	9642,97	-785,6455	8857,32
60	1,0472	23,298	23,8	7500,899	-2262,176	5238,72
70	1,2217	30,063	24,75	5130,917	-3465,855	1665,06
80	1,3963	36,959	24,74	2605,035	-4251,5	-1646,47
90	1,5708	43,73	23,88	9,19E-13	-4524,352	-4524,35
100	1,7453	50,156	22,28	-2605,04	-4251,5	-6856,54
110	1,9199	56,057	20,12	-5130,92	-3465,855	-8596,77
120	2,0944	61,298	17,56	-7500,9	-2262,176	-9763,08
130	2,2689	65,789	14,74	-9642,97	-785,6455	-10428,6
140	2,4435	69,477	11,8	-11492	785,64548	-10706,4
150	2,618	72,342	8,82	-12991,9	2262,176	-10729,8
160	2,7925	74,379	5,852	-14097,1	3465,8547	-10631,2
170	2,9671	75,595	2,915	-14773,9	4251,5002	-10522,4
180	3,1416	76	2E-15	-15001,8	4524,352	-10477,4
190	3,3161	75,595	-2,915	-14773,9	4251,5002	-10522,4
200	3,4907	74,379	-5,852	-14097,1	3465,8547	-10631,2
210	3,6652	72,342	-8,82	-12991,9	2262,176	-10729,8
220	3,8397	69,477	-11,8	-11492	785,64548	-10706,4
230	4,0143	65,789	-14,74	-9642,97	-785,6455	-10428,6
240	4,1888	61,298	-17,56	-7500,9	-2262,176	-9763,08
250	4,3633	56,057	-20,12	-5130,92	-3465,855	-8596,77
260	4,5379	50,156	-22,28	-2605,04	-4251,5	-6856,54
270	4,7124	43,73	-23,88	-2,8E-12	-4524,352	-4524,35
280	4,8869	36,959	-24,74	2605,035	-4251,5	-1646,47
290	5,0615	30,063	-24,75	5130,917	-3465,855	1665,06
300	5,236	23,298	-23,8	7500,899	-2262,176	5238,72
310	5,4105	16,937	-21,84	9642,97	-785,6455	8857,32
320	5,5851	11,258	-18,89	11492,04	785,64548	12277,7
330	5,7596	6,5236	-15,06	12991,94	2262,176	15254,1
340	5,9341	2,962	-10,48	14097,08	3465,8547	17562,9
350	6,1087	0,7501	-5,377	14773,89	4251,5002	19025,4
360	6,2832	3E-31	-8E-15	15001,8	4524,352	19526,2
370	6,4577	0,7501	5,377	14773,89	4251,5002	19025,4
380	6,6323	2,962	10,48	14097,08	3465,8547	17562,9
390	6,8068	6,5236	15,06	12991,94	2262,176	15254,1
400	6,9813	11,258	18,89	11492,04	785,64548	12277,7
410	7,1558	16,937	21,84	9642,97	-785,6455	8857,32
420	7,3304	23,298	23,8	7500,899	-2262,176	5238,72
430	7,5049	30,063	24,75	5130,917	-3465,855	1665,06
440	7,6794	36,959	24,74	2605,035	-4251,5	-1646,47
450	7,854	43,73	23,88	4,59E-12	-4524,352	-4524,35
460	8,0285	50,156	22,28	-2605,04	-4251,5	-6856,54
470	8,203	56,057	20,12	-5130,92	-3465,855	-8596,77
480	8,3776	61,298	17,56	-7500,9	-2262,176	-9763,08

490	8,5521	65,789	14,74	-9642,97	-785,6455	-10428,6
500	8,7266	69,477	11,8	-11492	785,64548	-10706,4
510	8,9012	72,342	8,82	-12991,9	2262,176	-10729,8
520	9,0757	74,379	5,852	-14097,1	3465,8547	-10631,2
530	9,2502	75,595	2,915	-14773,9	4251,5002	-10522,4
540	9,4248	76	6E-15	-15001,8	4524,352	-10477,4
550	9,5993	75,595	-2,915	-14773,9	4251,5002	-10522,4
560	9,7738	74,379	-5,852	-14097,1	3465,8547	-10631,2
570	9,9484	72,342	-8,82	-12991,9	2262,176	-10729,8
580	10,123	69,477	-11,8	-11492	785,64548	-10706,4
590	10,297	65,789	-14,74	-9642,97	-785,6455	-10428,6
600	10,472	61,298	-17,56	-7500,9	-2262,176	-9763,08
610	10,647	56,057	-20,12	-5130,92	-3465,855	-8596,77
620	10,821	50,156	-22,28	-2605,04	-4251,5	-6856,54
630	10,996	43,73	-23,88	-6,4E-12	-4524,352	-4524,35
640	11,17	36,959	-24,74	2605,035	-4251,5	-1646,47
650	11,345	30,063	-24,75	5130,917	-3465,855	1665,06
660	11,519	23,298	-23,8	7500,899	-2262,176	5238,72
670	11,694	16,937	-21,84	9642,97	-785,6455	8857,32
680	11,868	11,258	-18,89	11492,04	785,64548	12277,7
690	12,043	6,5236	-15,06	12991,94	2262,176	15254,1
700	12,217	2,962	-10,48	14097,08	3465,8547	17562,9
710	12,392	0,7501	-5,377	14773,89	4251,5002	19025,4
720	12,566	1E-30	-2E-14	15001,8	4524,352	19526,2

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя.

φ°	Δp_r , МПа	W , м/с ²	p_j , МПа	p , МПа	$\text{tg}\beta$	p_N , МПа	$1/\cos\beta$	p_s , МПа	$\cos(\beta+\varphi)/\cos\beta$	p_k , МПа	$\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$	p_T , МПа	T , кН	$M_{кр.ц}$, Нм
0	0,0117	15790	-1,863	-1,8515	0	0	1	-1,852	1	-1,852	0	0	0	0
10	0,0017	15389	-1,816	-1,8142	0,051	-0,093	1,0013	-1,817	0,975949	-1,771	0,223886	-0,40618	-2,5269	-89,7049
20	-0,0083	14217	-1,678	-1,6859	0,1009	-0,17	1,0051	-1,694	0,905187	-1,526	0,436786	-0,73638	-4,58115	-162,631
30	-0,0103	12366	-1,459	-1,4694	0,1483	-0,218	1,0109	-1,485	0,791829	-1,164	0,628393	-0,92337	-5,74442	-203,927
40	-0,0133	9977	-1,177	-1,1905	0,192	-0,229	1,0181	-1,212	0,642503	-0,765	0,789763	-0,94023	-5,8493	-207,65
50	-0,0163	7229	-0,853	-0,8692	0,2306	-0,2	1,0259	-0,892	0,465943	-0,405	0,913996	-0,79448	-4,9426	-175,462
60	-0,0193	4317	-0,509	-0,5287	0,2626	-0,139	1,0334	-0,546	0,272341	-0,144	0,996822	-0,527	-3,27855	-116,388
70	-0,0223	1436	-0,169	-0,1917	0,2866	-0,055	1,0395	-0,199	0,07245	-0,014	1,036977	-0,19881	-1,23684	-43,9077
80	-0,0243	-1241	0,1464	0,1222	0,3015	0,0368	1,0436	0,1275	-0,12345	-0,015	1,036231	0,126581	0,787477	27,95544
90	-0,0243	-3576	0,422	0,3977	0,3066	0,1219	1,045	0,4156	-0,30658	-0,122	0,998988	0,397327	2,471827	87,74987
100	-0,0194	-5480	0,6466	0,6272	0,3015	0,1891	1,0436	0,6545	-0,47042	-0,295	0,931515	0,584222	3,634524	129,0256
110	-0,0194	-6913	0,8157	0,7963	0,2866	0,2282	1,0395	0,8277	-0,61106	-0,487	0,840941	0,669611	4,165745	147,8839
120	-0,0194	-7888	0,9308	0,9113	0,2626	0,2393	1,0334	0,9417	-0,7271	-0,663	0,734265	0,66916	4,162936	147,7842
130	-0,0194	-8461	0,9985	0,979	0,2306	0,2257	1,0259	1,0044	-0,8192	-0,802	0,617579	0,604625	3,761458	133,5318
140	-0,0184	-8722	1,0292	1,0107	0,192	0,1941	1,0181	1,029	-0,88933	-0,899	0,495601	0,500919	3,116288	110,6282
150	-0,0174	-8773	1,0352	1,0178	0,1483	0,1509	1,0109	1,0288	-0,94012	-0,957	0,371548	0,378145	2,352493	83,51349
160	-0,0164	-8719	1,0288	1,0124	0,1009	0,1021	1,0051	1,0175	-0,97417	-0,986	0,247245	0,250302	1,557165	55,27937
170	-0,0144	-8647	1,0203	1,0059	0,051	0,0513	1,0013	1,0072	-0,99367	-1	0,12341	0,124137	0,772276	27,41581
180	-0,0124	-8616	1,0166	1,0042	4E-17	4E-17	1	1,0042	-1	-1,004	1,23E-16	1,23E-16	7,65E-16	2,72E-14
190	-0,0104	-8646	1,0202	1,0097	-0,051	-0,052	1,0013	1,0111	-0,99367	-1,003	-0,12341	-0,12461	-0,77524	-27,5209
200	-0,0084	-8716	1,0285	1,0201	-0,101	-0,103	1,0051	1,0252	-0,97417	-0,994	-0,24725	-0,25221	-1,56902	-55,7004
210	-0,0064	-8769	1,0347	1,0283	-0,148	-0,152	1,0109	1,0395	-0,94012	-0,967	-0,37155	-0,38207	-2,37691	-84,3805
220	-0,0044	-8717	1,0286	1,0242	-0,192	-0,197	1,0181	1,0427	-0,88933	-0,911	-0,4956	-0,50757	-3,15767	-112,097
230	-0,0036	-8455	0,9977	0,9941	-0,231	-0,229	1,0259	1,0199	-0,8192	-0,814	-0,61758	-0,61394	-3,81942	-135,589
240	0,0051	-7880	0,9299	0,935	-0,263	-0,245	1,0334	0,9662	-0,7271	-0,68	-0,73427	-0,68652	-4,27091	-151,617
250	0,0171	-6904	0,8147	0,8318	-0,287	-0,238	1,0395	0,8646	-0,61106	-0,508	-0,84094	-0,69945	-4,3514	-154,475
260	0,0337	-5470	0,6454	0,6791	-0,302	-0,205	1,0436	0,7087	-0,47042	-0,319	-0,93152	-0,63264	-3,93572	-139,718

270	0,0571	-3565	0,4207	0,4778	-0,307	-0,146	1,045	0,4993	-0,30658	-0,146	-0,99899	-0,47729	-2,96927	-105,409
280	0,0905	-1229	0,145	0,2355	-0,302	-0,071	1,0436	0,2458	-0,12345	-0,029	-1,03623	-0,24405	-1,51829	-53,8993
290	0,1397	1450	-0,171	-0,0314	-0,287	0,009	1,0395	-0,033	0,07245	-0,002	-1,03698	0,032526	0,202348	7,183367
300	0,2139	4332	-0,511	-0,2973	-0,263	0,078	1,0334	-0,307	0,272341	-0,081	-0,99682	0,296308	1,843371	65,43965
310	0,3293	7245	-0,855	-0,5255	-0,231	0,1212	1,0259	-0,539	0,465943	-0,245	-0,914	0,480351	2,988328	106,0856
320	0,5128	9994	-1,179	-0,6665	-0,192	0,128	1,0181	-0,679	0,642503	-0,428	-0,78976	0,526391	3,274752	116,2537
330	0,8722	12384	-1,461	-0,5891	-0,148	0,0874	1,0109	-0,596	0,791829	-0,467	-0,62839	0,370214	2,303151	81,76185
331	0,9283	12596	-1,486	-0,558	-0,144	0,0802	1,0102	-0,564	0,804911	-0,449	-0,61046	0,340665	2,119322	75,23594
332	0,9902	12803	-1,511	-0,5206	-0,139	0,0724	1,0096	-0,526	0,817624	-0,426	-0,59223	0,3083	1,917976	68,08816
333	1,0583	13004	-1,534	-0,4761	-0,134	0,064	1,0089	-0,48	0,82996	-0,395	-0,57371	0,27314	1,699244	60,32315
334	1,1335	13199	-1,557	-0,4239	-0,13	0,055	1,0083	-0,427	0,841912	-0,357	-0,55492	0,235252	1,463536	51,95554
335	1,2163	13388	-1,58	-0,3635	-0,125	0,0454	1,0077	-0,366	0,853474	-0,31	-0,53585	0,194755	1,211598	43,01173
336	1,3074	13570	-1,601	-0,2939	-0,12	0,0353	1,0072	-0,296	0,864637	-0,254	-0,51652	0,15183	0,944556	33,53175
337	1,4074	13747	-1,622	-0,2148	-0,115	0,0248	1,0066	-0,216	0,875397	-0,188	-0,49694	0,106728	0,663971	23,57099
338	1,5169	13917	-1,642	-0,1253	-0,111	0,0139	1,0061	-0,126	0,885745	-0,111	-0,47712	0,059777	0,371882	13,2018
339	1,6366	14080	-1,661	-0,0249	-0,106	0,0026	1,0056	-0,025	0,895677	-0,022	-0,45707	0,011388	0,070845	2,514988
340	1,7668	14237	-1,68	0,0869	-0,101	-0,009	1,0051	0,0873	0,905187	0,079	-0,43679	-0,03794	-0,23603	-8,37915
341	1,9081	14387	-1,698	0,2105	-0,096	-0,02	1,0046	0,2114	0,914269	0,192	-0,41629	-0,08762	-0,54507	-19,3501
342	2,0607	14530	-1,715	0,3462	-0,091	-0,032	1,0041	0,3476	0,922917	0,32	-0,39559	-0,13696	-0,85202	-30,2468
343	2,2248	14666	-1,731	0,4942	-0,086	-0,043	1,0037	0,496	0,931126	0,46	-0,3747	-0,18519	-1,15207	-40,8986
344	2,4002	14794	-1,746	0,6545	-0,081	-0,053	1,0033	0,6567	0,938893	0,615	-0,35363	-0,23145	-1,43989	-51,1159
345	2,5869	14916	-1,76	0,8268	-0,076	-0,063	1,0029	0,8292	0,946212	0,782	-0,33238	-0,27482	-1,70966	-60,6931
346	2,7842	15030	-1,773	1,0107	-0,071	-0,072	1,0025	1,0133	0,953078	0,963	-0,31096	-0,31429	-1,95525	-69,4112
347	2,9915	15136	-1,786	1,2054	-0,066	-0,08	1,0022	1,2081	0,959489	1,157	-0,2894	-0,34885	-2,17022	-77,0426
348	3,2077	15235	-1,798	1,41	-0,061	-0,086	1,0019	1,4126	0,96544	1,361	-0,26769	-0,37743	-2,34807	-83,3565
349	3,4316	15327	-1,809	1,6231	-0,056	-0,091	1,0016	1,6256	0,970928	1,576	-0,24585	-0,39903	-2,48239	-88,125
350	3,6615	15410	-1,818	1,8431	-0,051	-0,094	1,0013	1,8455	0,975949	1,799	-0,22389	-0,41264	-2,56708	-91,1313
351	3,8955	15486	-1,827	2,0681	-0,046	-0,095	1,0011	2,0703	0,9805	2,028	-0,20181	-0,41737	-2,59654	-92,177
352	4,1314	15554	-1,835	2,296	-0,041	-0,094	1,0008	2,2979	0,98458	2,261	-0,17964	-0,41246	-2,56596	-91,0914
353	4,3668	15615	-1,843	2,5243	-0,036	-0,09	1,0006	2,5259	0,988186	2,494	-0,15738	-0,39728	-2,47153	-87,7392
354	4,5991	15667	-1,849	2,7504	-0,031	-0,084	1,0005	2,7517	0,991315	2,727	-0,13504	-0,37142	-2,31068	-82,0291
355	4,8255	15711	-1,854	2,9716	-0,026	-0,076	1,0003	2,9725	0,993965	2,954	-0,11264	-0,33471	-2,08226	-73,9202

356	5,0430	15748	-1,858	3,1848	-0,02	-0,065	1,0002	3,1855	0,996136	3,173	-0,09018	-0,2872	-1,7867	-63,4278
357	5,2490	15776	-1,862	3,3874	-0,015	-0,052	1,0001	3,3878	0,997826	3,38	-0,06767	-0,22923	-1,42609	-50,6262
358	5,4405	15796	-1,864	3,5766	-0,01	-0,037	1,0001	3,5768	0,999033	3,573	-0,04513	-0,16142	-1,00423	-35,65
359	5,6151	15808	-1,865	3,7497	-0,005	-0,019	1	3,7497	0,999758	3,749	-0,02257	-0,08464	-0,52654	-18,6923
360	5,7703	15812	-1,866	3,9044	-7E-17	-3E-16	1	3,9044	1	3,904	-2,5E-16	-9,6E-16	-6E-15	-2,1E-13
361	5,9042	15808	-1,865	4,0388	0,0051	0,0207	1	4,0388	0,999758	4,038	0,022572	0,091163	0,567137	20,13338
362	6,0151	15796	-1,864	4,1511	0,0102	0,0425	1,0001	4,1513	0,999033	4,147	0,045133	0,187352	1,165546	41,37687
363	6,1020	15776	-1,862	4,2404	0,0154	0,0651	1,0001	4,2409	0,997826	4,231	0,067671	0,286952	1,785167	63,37344
364	6,1641	15748	-1,858	4,3058	0,0205	0,0881	1,0002	4,3067	0,996136	4,289	0,090177	0,388282	2,415559	85,75236
365	6,2012	15712	-1,854	4,3472	0,0256	0,1112	1,0003	4,3487	0,993965	4,321	0,112637	0,489662	3,046253	108,142
366	6,2138	15668	-1,849	4,365	0,0307	0,1339	1,0005	4,367	0,991315	4,327	0,135042	0,589459	3,667105	130,1822
367	6,2024	15615	-1,843	4,3598	0,0358	0,156	1,0006	4,3626	0,988186	4,308	0,157381	0,686148	4,268622	151,5361
368	6,1683	15555	-1,836	4,3328	0,0409	0,1771	1,0008	4,3364	0,98458	4,266	0,179641	0,778351	4,842232	171,8992
369	6,1130	15487	-1,828	4,2855	0,0459	0,1969	1,0011	4,29	0,9805	4,202	0,201813	0,864875	5,380508	191,008
370	6,0383	15412	-1,819	4,2197	0,051	0,2153	1,0013	4,2252	0,975949	4,118	0,223886	0,944733	5,877315	208,6447
371	5,9461	15328	-1,809	4,1374	0,0561	0,232	1,0016	4,1438	0,970928	4,017	0,245848	1,017159	6,32789	224,6401
372	5,8385	15237	-1,798	4,0406	0,0611	0,2469	1,0019	4,0481	0,96544	3,901	0,267688	1,081612	6,728861	238,8746
373	5,7178	15138	-1,786	3,9315	0,0661	0,26	1,0022	3,9401	0,959489	3,772	0,289397	1,137766	7,078199	251,2761
374	5,5860	15031	-1,774	3,8123	0,0712	0,2713	1,0025	3,8219	0,953078	3,633	0,310964	1,185494	7,375122	261,8168
375	5,4454	14917	-1,76	3,6851	0,0762	0,2806	1,0029	3,6958	0,946212	3,487	0,332377	1,224851	7,619967	270,5088
376	5,2978	14796	-1,746	3,5519	0,0811	0,2882	1,0033	3,5635	0,938893	3,335	0,353627	1,256045	7,814029	277,398
377	5,1452	14668	-1,731	3,4145	0,0861	0,294	1,0037	3,4271	0,931126	3,179	0,374703	1,27941	7,959391	282,5584
378	4,9893	14532	-1,715	3,2745	0,091	0,2981	1,0041	3,288	0,922917	3,022	0,395595	1,295383	8,058757	286,0859
379	4,8315	14389	-1,698	3,1335	0,096	0,3007	1,0046	3,1479	0,914269	2,865	0,416293	1,304469	8,115284	288,0926
380	4,6731	14239	-1,68	2,9928	0,1009	0,3018	1,0051	3,008	0,905187	2,709	0,436786	1,307225	8,132433	288,7014
381	4,5153	14083	-1,662	2,8535	0,1057	0,3017	1,0056	2,8694	0,895677	2,556	0,457066	1,304237	8,113841	288,0414
382	4,3590	13919	-1,642	2,7165	0,1106	0,3004	1,0061	2,733	0,885745	2,406	0,477121	1,296099	8,063213	286,2441
383	4,2050	13750	-1,622	2,5826	0,1154	0,298	1,0066	2,5997	0,875397	2,261	0,496944	1,283403	7,984229	283,4401
384	4,0541	13573	-1,602	2,4524	0,1202	0,2947	1,0072	2,47	0,864637	2,12	0,516523	1,266726	7,880479	279,757
385	3,9065	13391	-1,58	2,3264	0,125	0,2907	1,0077	2,3445	0,853474	1,986	0,53585	1,246623	7,755415	275,3172
386	3,8333	13202	-1,558	2,2755	0,1297	0,2951	1,0083	2,2945	0,841912	1,916	0,554917	1,262703	7,855453	278,8686
387	3,7025	13007	-1,535	2,1677	0,1344	0,2913	1,0089	2,1871	0,82996	1,799	0,573713	1,243617	7,736715	274,6534

388	3,5755	12806	-1,511	2,0644	0,1391	0,2871	1,0096	2,0842	0,817624	1,688	0,59223	1,222601	7,605973	270,012
389	3,4525	12600	-1,487	1,9658	0,1437	0,2825	1,0102	1,9859	0,804911	1,582	0,610459	1,200025	7,465522	265,026
390	3,3336	12388	-1,462	1,8718	0,1483	0,2776	1,0109	1,8922	0,791829	1,482	0,628393	1,176234	7,317516	259,7718
391	3,2186	12170	-1,436	1,7825	0,1529	0,2725	1,0115	1,8031	0,778386	1,387	0,646023	1,151551	7,16396	254,3206
392	3,1077	11948	-1,41	1,6979	0,1574	0,2672	1,0122	1,7187	0,764589	1,298	0,66334	1,126274	7,006709	248,7382
393	3,0008	11720	-1,383	1,6178	0,1619	0,2619	1,0129	1,6388	0,750447	1,214	0,680338	1,100678	6,84747	243,0852
394	2,8978	11487	-1,355	1,5423	0,1663	0,2565	1,0136	1,5634	0,735967	1,135	0,697009	1,075012	6,687802	237,417
395	2,7987	11250	-1,327	1,4712	0,1707	0,2511	1,0144	1,4924	0,721159	1,061	0,713345	1,049505	6,52912	231,7838
396	2,7035	11008	-1,299	1,4045	0,1751	0,2459	1,0151	1,4257	0,706032	0,992	0,729339	1,024362	6,3727	226,2308
397	2,6119	10762	-1,27	1,342	0,1794	0,2407	1,0158	1,3632	0,690593	0,927	0,744984	0,999766	6,219683	220,7988
398	2,5239	10511	-1,24	1,2836	0,1836	0,2357	1,0166	1,3049	0,674853	0,866	0,760274	0,97588	6,071084	215,5235
399	2,4395	10257	-1,21	1,2292	0,1878	0,2309	1,0173	1,2505	0,658819	0,81	0,775203	0,952847	5,927796	210,4367
400	2,3584	9999	-1,18	1,1786	0,192	0,2263	1,0181	1,1999	0,642503	0,757	0,789763	0,930793	5,790596	205,5661
410	1,7096	7251	-0,856	0,854	0,2306	0,1969	1,0259	0,8761	0,465943	0,398	0,913996	0,780538	4,855833	172,3821
420	1,2818	4339	-0,512	0,7698	0,2626	0,2021	1,0334	0,7955	0,272341	0,21	0,996822	0,767386	4,774019	169,4777
430	0,9954	1458	-0,172	0,8233	0,2866	0,2359	1,0395	0,8558	0,07245	0,06	1,036977	0,853754	5,311324	188,552
440	0,7990	-1219	0,1438	0,9428	0,3015	0,2843	1,0436	0,9839	-0,12345	-0,116	1,036231	0,976953	6,077763	215,7606
450	0,6612	-3554	0,4194	1,0806	0,3066	0,3313	1,045	1,1292	-0,30658	-0,331	0,998988	1,079503	6,715742	238,4089
460	0,5626	-5458	0,644	1,2066	0,3015	0,3638	1,0436	1,2592	-0,47042	-0,568	0,931515	1,123973	6,992392	248,2299
470	0,4910	-6891	0,8131	1,3041	0,2866	0,3737	1,0395	1,3556	-0,61106	-0,797	0,840941	1,096648	6,822399	242,1952
480	0,4385	-7866	0,9282	1,3666	0,2626	0,3588	1,0334	1,4122	-0,7271	-0,994	0,734265	1,003454	6,242625	221,6132
490	0,3998	-8439	0,9959	1,3957	0,2306	0,3218	1,0259	1,4319	-0,8192	-1,143	0,617579	0,861954	5,362336	190,3629
500	0,3717	-8700	1,0266	1,3983	0,192	0,2685	1,0181	1,4236	-0,88933	-1,244	0,495601	0,692992	4,311198	153,0475
510	0,2717	-8751	1,0326	1,3043	0,1483	0,1934	1,0109	1,3185	-0,94012	-1,226	0,371548	0,484614	3,014851	107,0272
520	0,1717	-8697	1,0262	1,1979	0,1009	0,1208	1,0051	1,204	-0,97417	-1,167	0,247245	0,29618	1,842578	65,41152
530	0,1617	-8625	1,0177	1,1794	0,051	0,0602	1,0013	1,181	-0,99367	-1,172	0,12341	0,145556	0,905525	32,14615
540	0,0617	-8594	1,014	1,0758	1E-16	1E-16	1	1,0758	-1	-1,076	3,68E-16	3,95E-16	2,46E-15	8,73E-14
550	0,0417	-8624	1,0176	1,0593	-0,051	-0,054	1,0013	1,0607	-0,99367	-1,053	-0,12341	-0,13073	-0,81328	-28,8716
560	0,0317	-8694	1,0259	1,0576	-0,101	-0,107	1,0051	1,063	-0,97417	-1,03	-0,24725	-0,2615	-1,6268	-57,7513
570	0,0217	-8747	1,0322	1,0539	-0,148	-0,156	1,0109	1,0653	-0,94012	-0,991	-0,37155	-0,39157	-2,436	-86,4779
580	0,0117	-8695	1,026	1,0377	-0,192	-0,199	1,0181	1,0565	-0,88933	-0,923	-0,4956	-0,51429	-3,19948	-113,582
590	0,0117	-8433	0,9951	1,0069	-0,231	-0,232	1,0259	1,033	-0,8192	-0,825	-0,61758	-0,62182	-3,86841	-137,329

600	0,0117	-7858	0,9273	0,939	-0,263	-0,247	1,0334	0,9703	-0,7271	-0,683	-0,73427	-0,68949	-4,28944	-152,275
610	0,0117	-6882	0,8121	0,8238	-0,287	-0,236	1,0395	0,8564	-0,61106	-0,503	-0,84094	-0,69278	-4,30988	-153,001
620	0,0117	-5448	0,6429	0,6546	-0,302	-0,197	1,0436	0,6831	-0,47042	-0,308	-0,93152	-0,60975	-3,79335	-134,664
630	0,0117	-3543	0,4181	0,4298	-0,307	-0,132	1,045	0,4492	-0,30658	-0,132	-0,99899	-0,42941	-2,67139	-94,8344
640	0,0117	-1207	0,1424	0,1541	-0,302	-0,046	1,0436	0,1608	-0,12345	-0,019	-1,03623	-0,15971	-0,99356	-35,2712
650	0,0117	1471	-0,174	-0,1619	-0,287	0,0464	1,0395	-0,168	0,07245	-0,012	-1,03698	0,167885	1,044439	37,07758
660	0,0117	4354	-0,514	-0,502	-0,263	0,1318	1,0334	-0,519	0,272341	-0,137	-0,99682	0,500406	3,113093	110,5148
670	0,0117	7266	-0,857	-0,8457	-0,231	0,195	1,0259	-0,868	0,465943	-0,394	-0,914	0,772972	4,808769	170,7113
680	0,0117	10016	-1,182	-1,1701	-0,192	0,2247	1,0181	-1,191	0,642503	-0,752	-0,78976	0,924124	5,749106	204,0933
690	0,0117	12406	-1,464	-1,4522	-0,148	0,2153	1,0109	-1,468	0,791829	-1,15	-0,62839	0,912531	5,676984	201,5329
700	0,0117	14259	-1,683	-1,6708	-0,101	0,1685	1,0051	-1,679	0,905187	-1,512	-0,43679	0,729785	4,540097	161,1735
710	0,0117	15432	-1,821	-1,8093	-0,051	0,0923	1,0013	-1,812	0,975949	-1,766	-0,22389	0,405068	2,519986	89,45951
720	0,0117	15834	-1,868	-1,8567	-1E-16	3E-16	1	-1,857	1	-1,857	-4,9E-16	9,1E-16	5,66E-15	2,01E-13

Таблица В2 – Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров.

φ°	Цилиндры								$M_{кр.ц},$ Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	φ° кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	φ° кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	φ° кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	φ° кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	
0	0	0	180	2E-14	360	5,8E-14	540	-2E-13	0
10	10	-59,93	190	-17,75	370	-18,86	550	177,59	81,047
20	20	-108,7	200	-36,04	380	-37,752	560	250,63	68,158
30	30	-136,1	210	-54,84	390	-56,654	570	233,04	-14,57
40	40	-138,3	220	-73,27	400	-74,655	580	190,62	-95,63
50	50	-116,5	230	-89,16	410	-90,804	590	160,39	-136,1
60	60	-76,8	240	-100,5	420	-101,36	600	150,74	-127,9
70	70	-28,31	250	-103,4	430	-102,64	610	156,67	-77,7
80	80	19,538	260	-94,82	440	-91,244	620	168,9	2,3754
90	90	59,094	270	-73,3	450	-65,381	630	178,81	99,222
100	100	86,18	280	-40,37	460	-26,07	640	180,8	200,54
110	110	98,074	290	-1,13	470	22,1266	650	172,83	291,9
120	120	97,388	300	36,024	480	71,3785	660	155,82	360,61
130	130	87,466	310	61,069	490	112,022	670	132,38	392,94
140	140	72,067	320	65,371	500	134,863	680	105,55	377,85
150	150	54,138	330	38,69	510	133,679	690	72,717	299,22
160	160	35,695	340	-27,56	520	107,143	700	43,732	159,01
170	170	17,663	350	-84,07	530	59,5392	710	21,416	14,55
180	180	2E-14	360	-2E-13	540	1,3E-13	720	6E-14	3E-14

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1- Силы, действующих на шатунную шейку коленчатого вала.

φ, град	K, Н	T, Н	P _K , Н	R _{ш.ш.} , Н	K _{рк} , Н	R _к , Н
0	0	-7,1390501	-14,5844	14,5844	-26,5653	26,56531
10	-1,577177	-6,8304374	-14,2757	14,3626	-26,2567	26,30402
20	-2,859958	-5,8844847	-13,3298	13,6331	-25,3107	25,47181
30	-3,581773	-4,4751162	-11,9204	12,4469	-23,9014	24,16826
40	-3,640278	-2,9291676	-10,3745	10,9946	-22,3554	22,64987
50	-3,066183	-1,5382639	-8,98357	9,4924	-20,9645	21,18756
60	-2,021044	-0,5362392	-7,98154	8,2334	-19,9625	20,06454
70	-0,744913	-0,0460411	-7,49135	7,5283	-19,4723	19,48654
80	0,51417	-0,0656646	-7,51097	7,5285	-19,4919	19,4987
90	1,555098	-0,4919014	-7,93721	8,0881	-19,9182	19,97877
100	2,267882	-1,1694303	-8,61474	8,9083	-20,5957	20,72017
110	2,580902	-1,9072029	-9,35251	9,7021	-21,3335	21,48901
120	2,562841	-2,5754165	-10,0207	10,3433	-22,0017	22,15043
130	2,301746	-3,0945254	-10,5398	10,7882	-22,5208	22,6381
140	1,896505	-3,4465846	-10,8919	11,0558	-22,8728	22,95133
150	1,424682	-3,6490248	-11,0943	11,1854	-23,0753	23,11922
160	0,939349	-3,7453844	-11,1907	11,2300	-23,1716	23,19067
170	0,464817	-3,7866993	-11,232	11,2416	-23,213	23,21761
180	4,66E-16	-3,8025224	-11,2478	11,2478	-23,2288	23,22878
190	-0,46706	-3,8049714	-11,2503	11,2600	-23,2312	23,23592
200	-0,948341	-3,7812391	-11,2265	11,2665	-23,2075	23,22686
210	-1,443282	-3,6966634	-11,142	11,2351	-23,1229	23,16792
220	-1,928124	-3,5040478	-10,9494	11,1178	-22,9303	23,01123
230	-2,346321	-3,1544527	-10,5998	10,8563	-22,5807	22,70228
240	-2,645146	-2,6581256	-10,1034	10,4440	-22,0844	22,24223
250	-2,72159	-2,0111662	-9,45647	9,8403	-21,4374	21,60949
260	-2,495179	-1,286636	-8,73194	9,0814	-20,7129	20,86264
270	-1,92896	-0,6101599	-8,05547	8,2832	-20,0364	20,12906
280	-1,062337	-0,1356709	-7,58098	7,6550	-19,5619	19,59075
290	-0,029749	0,00183874	-7,44347	7,4435	-19,4244	19,42444
300	0,948003	-0,2515316	-7,69684	7,7550	-19,6778	19,70061
310	1,607081	-0,8062514	-8,25156	8,4066	-20,2325	20,29623
320	1,720282	-1,384233	-8,82954	8,9956	-20,8105	20,88147
330	1,018149	-1,2720898	-8,7174	8,7767	-20,6983	20,72337
340	-0,725367	1,49247243	-5,95283	5,9969	-17,9338	17,94845
350	-2,212322	9,5811237	2,135818	3,0751	-9,84513	10,09064
360	-4,74E-15	19,3272274	11,88192	11,8819	-0,09903	0,099029
363	4,673357	20,2393786	12,79407	13,6209	0,813122	4,743568
370	6,595405	13,5703245	6,125019	9,0008	-5,85593	8,819938
380	6,132526	7,66206218	0,216757	6,1364	-11,7642	13,26666
390	5,016343	4,03642495	-3,40888	6,0650	-15,3898	16,18674
400	4,22068	2,11746004	-5,32785	6,7971	-17,3088	17,81596
410	3,966739	1,05248603	-6,39282	7,5235	-18,3738	18,79709
420	4,122797	0,25481948	-7,19049	8,2886	-19,1714	19,60973
430	4,444667	-0,5676275	-8,01293	9,1631	-19,9939	20,48195
440	4,705511	-1,4884256	-8,93373	10,0972	-20,9147	21,43748
450	4,757788	-2,453347	-9,89865	10,9827	-21,8796	22,39093
460	4,548167	-3,3609476	-10,8063	11,7244	-22,7872	23,23666
470	4,100605	-4,1207261	-11,566	12,2714	-23,547	23,90137
480	3,483776	-4,6836768	-12,129	12,6194	-24,1099	24,36033

490	2,777677	-5,0479698	-12,4933	12,7983	-24,4742	24,63135
500	1,913598	-4,90128	-12,3466	12,4940	-24,3275	24,40268
510	1,150842	-4,5886516	-12,034	12,0889	-24,0149	24,04247
520	0,56359	-4,591367	-12,0367	12,0499	-24,0176	24,02423
530	1,52E-15	-4,1433251	-11,5886	11,5886	-23,5696	23,56958
540	-0,496303	-4,0432035	-11,4885	11,4992	-23,4695	23,47471
550	-0,993474	-3,9611941	-11,4065	11,4497	-23,3875	23,40854
560	-1,490883	-3,8185838	-11,2639	11,3621	-23,2448	23,2926
570	-1,964604	-3,5703441	-11,0156	11,1895	-22,9966	23,08037
580	-2,389571	-3,2125998	-10,6579	10,9225	-22,6389	22,76462
590	-2,667464	-2,6805532	-10,1259	10,4713	-22,1068	22,26716
600	-2,700972	-1,9959302	-9,44124	9,8200	-21,4222	21,59179
610	-2,401148	-1,238149	-8,68345	9,0093	-20,6644	20,80344
620	-1,720554	-0,5442377	-7,98954	8,1727	-19,9705	20,04447
630	-0,686049	-0,0876152	-7,53292	7,5641	-19,5139	19,52593
640	0,582278	-0,0359891	-7,48129	7,5039	-19,4622	19,47095
650	1,878381	-0,4983867	-7,94369	8,1628	-19,9246	20,01299
660	2,94796	-1,4789532	-8,92426	9,3986	-20,9052	21,11204
670	3,549029	-2,8557435	-10,301	10,8953	-22,282	22,56287
680	3,51786	-4,3952623	-11,8406	12,3521	-23,8215	24,07987
690	2,819562	-5,8013684	-13,2467	13,5434	-25,2276	25,3847
700	1,566822	-6,7855942	-14,2309	14,3169	-26,2119	26,25864
710	3,5E-15	-7,1390501	-14,5844	14,5844	-26,5653	26,56531
720	0	0	-7,44531	7,4453	-19,4263	19,42626

Таблица Г2 - Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки.

R _{ш.ш} i	Значения R _{ш.ш} i, кН, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R _{ш.ш} 0	12414,1	12414,1	12414,1	0	0	0	0	0	0	0	12414,1	12414,1
R _{ш.ш} 10	12207,8	12207,8	12207,8	0	0	0	0	0	0	0	12207,8	12207,8
R _{ш.ш} 20	11520,1	11520,1	11520,1	0	0	0	0	0	0	0	11520,1	11520,1
R _{ш.ш} 30	10387,2	10387,2	10387,2	0	0	0	0	0	0	0	0	10387,2
R _{ш.ш} 40	8975,53	8975,53	8975,53	0	0	0	0	0	0	0	0	8975,53
R _{ш.ш} 50	7471,42	7471,42	7471,42	0	0	0	0	0	0	0	0	7471,42
R _{ш.ш} 60	6152,66	6152,66	6152,66	0	0	0	0	0	0	0	0	6152,66
R _{ш.ш} 70	5372,94	5372,94	5372,94	0	0	0	0	0	0	0	5372,94	5372,94
R _{ш.ш} 80	5365,37	5365,37	5365,37	0	0	0	0	0	0	0	5365,37	5365,37
R _{ш.ш} 90	5972,9	5972,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5972,9	5972,9
R _{ш.ш} 100	6831,84	6831,84	0	0	0	0	0	0	0	0	6831,84	6831,84
R _{ш.ш} 110	7631,85	7631,85	0	0	0	0	0	0	0	0	7631,85	7631,85
R _{ш.ш} 120	8258,17	8258,17	0	0	0	0	0	0	0	0	8258,17	8258,17
R _{ш.ш} 130	8680,27	8680,27	0	0	0	0	0	0	0	0	8680,27	8680,27
R _{ш.ш} 140	8925,41	8925,41	0	0	0	0	0	0	0	0	8925,41	8925,41
R _{ш.ш} 150	9037,04	9037,04	0	0	0	0	0	0	0	0	9037,04	9037,04
R _{ш.ш} 160	9069,17	9069,17	9069,17	0	0	0	0	0	0	0	9069,17	9069,17
R _{ш.ш} 170	9073,62	9073,62	9073,62	0	0	0	0	0	0	0	9073,62	9073,62
R _{ш.ш} 180	9077,53	9077,53	9077,53	0	0	0	0	0	0	0	9077,53	9077,53
R _{ш.ш} 190	9091,98	9091,98	9091,98	0	0	0	0	0	0	0	9091,98	9091,98
R _{ш.ш} 200	9105,76	9105,76	9105,76	0	0	0	0	0	0	0	9105,76	9105,76
R _{ш.ш} 210	9087,02	9087,02	9087,02	0	0	0	0	0	0	0	0	9087,02
R _{ш.ш} 220	8988,3	8988,3	8988,3	0	0	0	0	0	0	0	0	8988,3
R _{ш.ш} 230	8749,92	8749,92	8749,92	0	0	0	0	0	0	0	0	8749,92
R _{ш.ш} 240	8362,5	8362,5	8362,5	0	0	0	0	0	0	0	0	8362,5
R _{ш.ш} 250	7777,88	7777,88	7777,88	0	0	0	0	0	0	0	0	7777,88
R _{ш.ш} 260	7020,05	7020,05	7020,05	0	0	0	0	0	0	0	0	7020,05
R _{ш.ш} 270	6193,23	6193,23	6193,23	0	0	0	0	0	0	0	0	6193,23
R _{ш.ш} 280	5513,98	5513,98	5513,98	0	0	0	0	0	0	0	5513,98	5513,98
R _{ш.ш} 290	5273,25	5273,25	5273,25	0	0	0	0	0	0	0	5273,25	5273,25
R _{ш.ш} 300	5607,26	5607,26	0	0	0	0	0	0	0	0	5607,26	5607,26
R _{ш.ш} 310	6290,03	6290,03	0	0	0	0	0	0	0	0	6290,03	6290,03
R _{ш.ш} 320	6877,85	6877,85	0	0	0	0	0	0	0	0	6877,85	6877,85
R _{ш.ш} 330	6625,79	6625,79	0	0	0	0	0	0	0	0	6625,79	6625,79

RIII.III 340	3851,46	3851,46	3851,46	0	0	0	0	0	0	0	3851,46	3851,46
RIII.III 350	4841,18	4841,18	4841,18	0	0	0	0	0	0	0	4841,18	4841,18
RIII.III 360	14052,2	14052,2	14052,2	0	0	0	0	0	0	0	14052,2	14052,2
RIII.III 370	15677,1	15677,1	15677,1	0	0	0	0	0	0	0	15677,1	15677,1
RIII.III 380	10597,7	10597,7	10597,7	0	0	10597,72	10597,7	10597,7	0	0	10597,7	10597,7
RIII.III 390	0	0	0	0	0	0	0	0	6580,72	6580,72	6580,72	6580,72
RIII.III 400	5166,99	5166,99	0	0	0	0	0	0	0	0	5166,99	5166,99
RIII.III 410	5271,08	5271,08	0	0	0	0	0	0	0	0	5271,08	5271,08
RIII.III 420	5793,51	5793,51	0	0	0	0	0	0	0	0	5793,51	5793,51
RIII.III 430	6496,13	6496,13	0	0	0	0	0	0	0	0	6496,13	6496,13
RIII.III 440	7341,08	7341,08	0	0	0	0	0	0	0	0	7341,08	7341,08
RIII.III 450	8239,29	0	0	0	0	0	0	0	0	8239,29	8239,29	8239,29
RIII.III 460	9075,46	9075,46	0	0	0	0	0	0	0	0	9075,46	9075,46
RIII.III 470	9760,41	9760,41	0	0	0	0	0	0	0	0	9760,41	9760,41
RIII.III 480	10251,6	10251,6	0	0	0	0	0	0	0	0	10251,6	10251,6
RIII.III 490	10550,5	10550,5	0	0	0	0	0	0	0	0	10550,5	10550,5
RIII.III 500	10690,2	10690,2	0	0	0	0	0	0	0	0	10690,2	10690,2
RIII.III 510	10354,6	10354,6	0	0	0	0	0	0	0	0	10354,6	10354,6
RIII.III 520	9930,57	9930,57	9930,57	0	0	0	0	0	0	0	9930,57	9930,57
RIII.III 530	9882,46	9882,46	9882,46	0	0	0	0	0	0	0	9882,46	9882,46
RIII.III 540	9418,33	9418,33	9418,33	0	0	0	0	0	0	0	9418,33	9418,33
RIII.III 550	9331,42	9331,42	9331,42	0	0	0	0	0	0	0	9331,42	9331,42
RIII.III 560	9289,48	9289,48	9289,48	0	0	0	0	0	0	0	9289,48	9289,48
RIII.III 570	9215	9215	9215	0	0	0	0	0	0	0	0	9215
RIII.III 580	9060,9	9060,9	9060,9	0	0	0	0	0	0	0	0	9060,9
RIII.III 590	8817,57	8817,57	8817,57	0	0	0	0	0	0	0	0	8817,57
RIII.III 600	8390,85	8390,85	8390,85	0	0	0	0	0	0	0	0	8390,85
RIII.III 610	7756,4	7756,4	7756,4	0	0	0	0	0	0	0	0	7756,4
RIII.III 620	6941,67	6941,67	6941,67	0	0	0	0	0	0	0	0	6941,67
RIII.III 630	6068,27	6068,27	6068,27	0	0	0	0	0	0	0	0	6068,27
RIII.III 640	5406,33	5406,33	5406,33	0	0	0	0	0	0	0	5406,33	5406,33
RIII.III 650	5342,82	5342,82	5342,82	0	0	0	0	0	0	0	5342,82	5342,82
RIII.III 660	6071,28	6071,28	0	0	0	0	0	0	0	0	6071,28	6071,28
RIII.III 670	7369,29	7369,29	0	0	0	0	0	0	0	0	7369,29	7369,29
RIII.III 680	8871,57	8871,57	0	0	0	0	0	0	0	0	8871,57	8871,57
RIII.III 690	10290,3	10290,3	0	0	0	0	0	0	0	0	10290,3	10290,3
RIII.III 700	11429,6	11429,6	0	0	0	0	0	0	0	0	11429,6	11429,6

Рш.ш 710	12162	12162	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12162	12162		
ΣРш.ш i	12414,1	12414,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12414,1	12414,1

Таблица Г3 – Расчет сил, действующих на коренные шейки коленчатого вала.

1-я коренная шейка	1-й кривошип				2-я коренная шейка			2-й кривошип			3-я коренная шейка			3-й кривошип		
	Рк.ш1, Н	јкв, град	Рк1, Н	Т1, Н	Крк1, Н	Тк2, Н	Кк2, Н	Рк.ш2, Н	јкв, град	Т2, Н	Крк2, Н	Тк3, Н	Кк3, Н	Рк.ш3, Н	јкв, град	Т3, Н
10516,3	0	21032,59	0	-21032,59	2,3E-13	1668,3	1668,26	180	4,7E-13	-17696,06	9,9E-13	-17866,46	17866,46	540	1,52E-12	-18036,87
10392	10	20783,91	-1577,18	-20723,98	555,058	1512,7	1611,35	190	-467,06	-17698,51	-481,681	-17817,63	17824,14	550	-496,303	-17936,74
9991,87	20	19983,73	-2859,96	-19778,03	955,808	1051,6	1421,08	200	-948,34	-17674,78	-970,908	-17764,76	17791,27	560	-993,474	-17854,73
9357,31	30	18714,61	-3581,77	-18368,66	1069,25	389,23	1137,89	210	-1443,3	-17590,2	-1467,08	-17651,16	17712,03	570	-1490,88	-17712,12
8606,03	40	17212,06	-3640,28	-16822,71	856,077	-287,44	903,045	220	-1928,1	-17397,59	-1946,36	-17430,74	17539,07	580	-1964,6	-17463,88
7866,73	50	15733,47	-3066,18	-15431,8	359,931	-808,09	884,628	230	-2346,3	-17047,99	-2367,95	-17077,07	17240,46	590	-2389,57	-17106,14
7285,31	60	14570,63	-2021,04	-14429,78	-312,051	-1060,9	1105,88	240	-2645,1	-16551,67	-2656,31	-16562,88	16774,53	600	-2667,46	-16574,09
6979,74	70	13959,47	-744,913	-13939,58	-988,339	-982,56	1393,64	250	-2721,6	-15904,71	-2711,28	-15897,09	16126,64	610	-2700,97	-15889,47
6984,34	80	13968,67	514,1702	-13959,21	-1504,67	-610,49	1623,8	260	-2495,2	-15180,18	-2448,16	-15155,93	15352,39	620	-2401,15	-15131,69
7234,63	90	14469,25	1555,098	-14385,44	-1742,03	-59,129	1743,03	270	-1929	-14503,7	-1824,76	-14470,74	14585,34	630	-1720,55	-14437,78
7616,37	100	15232,74	2267,882	-15062,97	-1665,11	516,88	1743,49	280	-1062,3	-14029,21	-874,193	-14005,18	14032,44	640	-686,049	-13981,16
8005,07	110	16010,14	2580,902	-15800,74	-1305,33	954,52	1617,09	290	-29,749	-13891,7	276,264	-13910,62	13913,36	650	582,2785	-13929,53
8333,59	120	16667,17	2562,841	-16468,96	-807,419	1161,9	1414,93	300	948,003	-14145,07	1413,19	-14268,5	14338,31	660	1878,381	-14391,93
8571,65	130	17143,29	2301,746	-16988,07	-347,333	1144,1	1195,7	310	1607,08	-14699,79	2277,52	-15036,14	15207,65	670	2947,96	-15372,49
8721,76	140	17443,53	1896,505	-17340,13	-88,1115	1031,2	1034,93	320	1720,28	-15277,77	2634,66	-16013,53	16228,82	680	3549,029	-16749,28
8800,16	150	17600,32	1424,682	-17542,57	-203,266	1188,5	1205,72	330	1018,15	-15165,63	2268	-16727,22	16880,27	690	3517,86	-18288,8
8831,96	160	17663,92	939,349	-17638,93	-832,358	2618,9	2748,02	340	-725,37	-12401,07	1047,1	-16047,99	16082,11	700	2819,562	-19694,91
8843,17	170	17686,35	464,8168	-17680,24	-1338,57	6683,9	6816,63	350	-2212,3	-4312,417	-322,75	-12495,78	12499,94	710	1566,822	-20679,13
8848,03	180	17696,06	4,66E-13	-17696,06	-2,6E-12	11565	11564,9	360	-5E-12	5433,687	-6,2E-13	-7799,452	7799,452	720	3,5E-12	-21032,59
8852,34	190	17704,67	-467,06	-17698,51	2570,21	12022	12293,8	370	4673,36	6345,838	2336,68	-7343,377	7706,182	0	0	-21032,59
8850,1	200	17700,2	-948,341	-17674,78	3771,87	8675,8	9460,24	380	6595,41	-323,2163	2509,11	-10523,6	10818,58	10	-1577,18	-20723,98

8824,66	210	17649,32	-1443,28	-17590,2	3787,9	5679,4	6826,67	390	6132,53	-6231,479	1636,28	-13004,75	13107,29	20	-2859,96	-19778,03
8752,05	220	17504,11	-1928,12	-17397,59	3472,23	3770,2	5125,53	400	5016,34	-9857,116	717,285	-14112,89	14131,1	30	-3581,77	-18368,66
8604,35	230	17208,7	-2346,32	-17047,99	3283,5	2636	4210,66	410	4220,68	-11776,08	290,201	-14299,39	14302,34	40	-3640,28	-16822,71
8380,85	240	16761,7	-2645,15	-16551,67	3305,94	1855,3	3790,96	420	3966,74	-12841,05	450,278	-14136,43	14143,6	50	-3066,18	-15431,8
8067,94	250	16135,88	-2721,59	-15904,71	3422,19	1133	3604,87	430	4122,8	-13638,72	1050,88	-14034,25	14073,54	60	-2021,04	-14429,78
7691,94	260	15383,88	-2495,18	-15180,18	3469,92	359,5	3488,5	440	4444,67	-14461,17	1849,88	-14200,38	14320,36	70	-744,913	-13939,58
7315,71	270	14631,41	-1928,96	-14503,7	3317,24	-439,13	3346,18	450	4705,51	-15381,97	2609,84	-14670,59	14900,92	80	514,1702	-13959,21
7034,69	280	14069,38	-1062,34	-14029,21	2910,06	-1158,8	3132,31	460	4757,79	-16346,89	3156,44	-15366,16	15687,01	90	1555,098	-14385,44
6945,87	290	13891,73	-29,7495	-13891,7	2288,96	-1681,4	2840,14	470	4548,17	-17254,49	3408,02	-16158,73	16514,21	100	2267,882	-15062,97
7088,4	300	14176,8	948,0032	-14145,07	1576,3	-1934,6	2495,47	480	4100,61	-18014,27	3340,75	-16907,51	17234,4	110	2580,902	-15800,74
7393,69	310	14787,38	1607,081	-14699,79	938,348	-1938,7	2153,86	490	3483,78	-18577,22	3023,31	-17523,09	17781,99	120	2562,841	-16468,96
7687,16	320	15374,32	1720,282	-15277,77	528,698	-1831,9	1906,64	500	2777,68	-18941,51	2539,71	-17964,79	18143,42	130	2301,746	-16988,07
7599,88	330	15199,77	1018,149	-15165,63	447,724	-1814,6	1869,01	510	1913,6	-18794,82	1905,05	-18067,47	18167,63	140	1896,505	-17340,13
6211,13	340	12422,26	-725,367	-12401,07	938,104	-3040,6	3181,99	520	1150,84	-18482,19	1287,76	-18012,38	18058,35	150	1424,682	-17542,57
2423,39	350	4846,783	-2212,32	-4312,417	1387,96	-7086,2	7220,89	530	563,59	-18484,91	751,469	-18061,92	18077,54	160	939,349	-17638,93
2716,84	360	5433,687	-4,7E-12	5433,687	3,1E-12	-11735	11735,3	540	1,5E-12	-18036,87	232,408	-17858,55	17860,07	170	464,8168	-17680,24
3940,49	370	7880,985	4673,357	6345,838	-2584,83	-12141	12413,4	550	-496,3	-17936,74	-248,151	-17816,4	17818,13	180	4,66E-13	-17696,06
3301,66	380	6603,32	6595,405	-323,2163	-3794,44	-8765,8	9551,77	560	-993,47	-17854,73	-730,267	-17776,62	17791,62	190	-467,06	-17698,51
4371,48	390	8742,952	6132,526	-6231,479	-3811,7	-5740,3	6890,6	570	-1490,9	-17712,12	-1219,61	-17693,45	17735,44	200	-948,341	-17674,78
5530,06	400	11060,13	5016,343	-9857,116	-3490,47	-3803,4	5162,28	580	-1964,6	-17463,88	-1703,94	-17527,04	17609,68	210	-1443,28	-17590,2
6254,8	410	12509,61	4220,68	-11776,08	-3305,13	-2665	4245,73	590	-2389,6	-17106,14	-2158,85	-17251,86	17386,42	220	-1928,12	-17397,59
6719,89	420	13439,78	3966,739	-12841,05	-3317,1	-1866,5	3806,19	600	-2667,5	-16574,09	-2506,89	-16811,04	16996,93	230	-2346,32	-17047,99
7124,12	430	14248,23	4122,797	-13638,72	-3411,88	-1125,4	3592,69	610	-2701	-15889,47	-2673,06	-16220,57	16439,35	240	-2645,15	-16551,67
7564,4	440	15128,8	4444,667	-14461,17	-3422,91	-335,26	3439,29	620	-2401,1	-15131,69	-2561,37	-15518,2	15728,16	250	-2721,59	-15904,71
8042,8	450	16085,61	4705,511	-15381,97	-3213,03	472,09	3247,53	630	-1720,6	-14437,78	-2107,87	-14808,98	14958,24	260	-2495,18	-15180,18
8512,6	460	17025,2	4757,788	-16346,89	-2721,92	1182,9	2967,83	640	-686,05	-13981,16	-1307,5	-14242,43	14302,32	270	-1928,96	-14503,7
8921,93	470	17843,86	4548,167	-17254,49	-1982,94	1662,5	2587,64	650	582,278	-13929,53	-240,03	-13979,37	13981,43	280	-1062,34	-14029,21
9237,54	480	18475,09	4100,605	-18014,27	-1111,11	1811,2	2124,83	660	1878,38	-14391,93	924,316	-14141,81	14171,99	290	-29,7495	-13891,7
9450,53	490	18901,05	3483,776	-18577,22	-267,908	1602,4	1624,6	670	2947,96	-15372,49	1947,98	-14758,78	14886,78	300	948,0032	-14145,07

9572,05	500	19144,09	2777,677	-18941,51	385,676	1096,1	1161,99	680	3549,03	-16749,28	2578,05	-15724,54	15934,47	310	1607,081	-14699,79
9445,99	510	18891,99	1913,598	-18794,82	802,131	253,01	841,087	690	3517,86	-18288,8	2619,07	-16783,29	16986,42	320	1720,282	-15277,77
9258,99	520	18517,99	1150,842	-18482,19	834,36	-606,36	1031,42	700	2819,56	-19694,91	1918,86	-17430,27	17535,57	330	1018,149	-15165,63
9246,75	530	18493,5	563,5897	-18484,91	501,616	-1097,1	1206,35	710	1566,82	-20679,13	420,728	-16540,1	16545,45	340	-725,367	-12401,07
9018,43	540	18036,87	1,52E-12	-18036,87	9,9E-13	-1497,9	1497,86	720	3,5E-12	-21032,59	-1106,16	-12672,5	12720,69	350	-2212,32	-4312,417
8971,8	550	17943,61	-496,303	-17936,74	248,151	-1547,9	1567,69	0	0	-21032,59	-2,4E-12	-7799,452	7799,452	360	-4,7E-12	5433,6866
8941,18	560	17882,35	-993,474	-17854,73	-291,851	-1434,6	1464,01	10	-1577,2	-20723,98	1548,09	-7189,07	7353,864	370	4673,357	6345,8378
8887,38	570	17774,76	-1490,88	-17712,12	-684,538	-1033	1239,18	20	-2860	-19778,03	1867,72	-10050,62	10222,69	380	6595,405	-323,2163
8787,02	580	17574,04	-1964,6	-17463,88	-808,585	-452,39	926,532	30	-3581,8	-18368,66	1275,38	-12300,07	12366,01	390	6132,526	-6231,479
8636,12	590	17272,23	-2389,57	-17106,14	-625,354	141,72	641,21	40	-3640,3	-16822,71	688,032	-13339,91	13357,64	400	5016,343	-9857,116
8393,69	600	16787,37	-2667,46	-16574,09	-199,359	571,14	604,938	50	-3066,2	-15431,8	577,249	-13603,94	13616,18	410	4220,68	-11776,08
8058,7	610	16117,4	-2700,97	-15889,47	339,964	729,85	805,14	60	-2021	-14429,78	972,847	-13635,42	13670,08	420	3966,739	-12841,05
7660,51	620	15321,02	-2401,15	-15131,69	828,118	596,05	1020,32	70	-744,91	-13939,58	1688,94	-13789,15	13892,2	430	4122,797	-13638,72
7269,97	630	14539,94	-1720,55	-14437,78	1117,36	239,29	1142,7	80	514,17	-13959,21	2479,42	-14210,19	14424,87	440	4444,667	-14461,17
6998,99	640	13997,98	-686,049	-13981,16	1120,57	-202,14	1138,66	90	1555,1	-14385,44	3130,3	-14883,7	15209,32	450	4705,511	-15381,97
6970,85	650	13941,69	582,2785	-13929,53	842,802	-566,72	1015,62	100	2267,88	-15062,97	3512,83	-15704,93	16093,01	460	4757,788	-16346,89
7256,99	660	14513,99	1878,381	-14391,93	351,261	-704,41	787,131	110	2580,9	-15800,74	3564,53	-16527,62	16907,63	470	4548,167	-17254,49
7826,3	670	15652,6	2947,96	-15372,49	-192,56	-548,23	581,066	120	2562,84	-16468,96	3331,72	-17241,61	17560,57	480	4100,605	-18014,27
8560,58	680	17121,16	3549,029	-16749,28	-623,642	-119,39	634,967	130	2301,75	-16988,07	2892,76	-17782,64	18016,39	490	3483,776	-18577,22
9312,03	690	18624,06	3517,86	-18288,8	-810,678	474,34	939,253	140	1896,5	-17340,13	2337,09	-18140,82	18290,74	500	2777,677	-18941,51
9947,86	700	19895,71	2819,562	-19694,91	-697,44	1076,2	1282,41	150	1424,68	-17542,57	1669,14	-18168,69	18245,2	510	1913,598	-18794,82
10369,2	710	20738,41	1566,822	-20679,13	-313,737	1520,1	1552,14	160	939,349	-17638,93	1045,1	-18060,56	18090,77	520	1150,842	-18482,19
10516,3	720	21032,59	3,5E-12	-21032,59	232,408	1676,2	1692,21	170	464,817	-17680,24	514,203	-18082,57	18089,88	530	563,5897	-18484,91

Таблица Г4 – силы, действующие на 3-ю коренную шейку.

Рк.ш i	Значения Рк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рк.ш 0	17866,46	17866,46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17866,5
Рк.ш 10	17824,14	17824,14	17824,1	0	0	0	0	0	0	0	0	17824,1
Рк.ш 20	17791,27	17791,27	17791,3	0	0	0	0	0	0	0	0	17791,3
Рк.ш 30	17712,03	17712,03	17712	0	0	0	0	0	0	0	0	17712
Рк.ш 40	17539,07	17539,07	17539,1	0	0	0	0	0	0	0	0	17539,1
Рк.ш 50	17240,46	17240,46	17240,5	0	0	0	0	0	0	0	0	17240,5
Рк.ш 60	16774,53	16774,53	16774,5	0	0	0	0	0	0	0	0	16774,5
Рк.ш 70	16126,64	16126,64	16126,6	0	0	0	0	0	0	0	0	16126,6
Рк.ш 80	15352,39	15352,39	0	0	0	0	0	0	0	0	15352,4	15352,4
Рк.ш 90	14585,34	14585,34	0	0	0	0	0	0	0	0	14585,3	14585,3
Рк.ш 100	14032,44	14032,44	0	0	0	0	0	0	0	0	14032,4	14032,4
Рк.ш 110	13913,36	13913,36	0	0	0	0	0	0	0	0	13913,4	13913,4
Рк.ш 120	14338,31	14338,31	0	0	0	0	0	0	0	0	14338,3	14338,3
Рк.ш 130	15207,65	15207,65	0	0	0	0	0	0	0	0	15207,7	15207,7
Рк.ш 140	16228,82	16228,82	0	0	0	0	0	0	0	0	16228,8	16228,8
Рк.ш 150	16880,27	16880,27	0	0	0	0	0	0	0	0	16880,3	16880,3
Рк.ш 160	16082,11	16082,11	0	0	0	0	0	0	0	0	16082,1	16082,1
Рк.ш 170	12499,94	12499,94	0	0	0	0	0	0	0	0	12499,9	12499,9
Рк.ш 180	7799,452	7799,452	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7799,45
Рк.ш 190	7706,182	7706,182	7706,18	0	0	0	0	0	0	0	0	7706,18
Рк.ш 200	10818,58	10818,58	10818,6	0	0	0	0	0	0	0	0	10818,6
Рк.ш 210	13107,29	13107,29	13107,3	0	0	0	0	0	0	0	0	13107,3
Рк.ш 220	14131,1	14131,1	14131,1	0	0	0	0	0	0	0	0	14131,1
Рк.ш 230	14302,34	14302,34	14302,3	0	0	0	0	0	0	0	0	14302,3
Рк.ш 240	14143,6	14143,6	14143,6	0	0	0	0	0	0	0	0	14143,6
Рк.ш 250	14073,54	14073,54	14073,5	0	0	0	0	0	0	0	0	14073,5
Рк.ш 260	14320,36	14320,36	14320,4	0	0	0	0	0	0	0	0	14320,4
Рк.ш 270	14900,92	14900,92	14900,9	0	0	0	0	0	0	0	0	14900,9
Рк.ш 280	15687,01	15687,01	15687	0	0	0	0	0	0	0	0	15687
Рк.ш 290	16514,21	16514,21	16514,2	0	0	0	0	0	0	0	0	16514,2
Рк.ш 300	17234,4	17234,4	0	0	0	0	0	0	0	0	17234,4	17234,4
Рк.ш 310	17781,99	17781,99	0	0	0	0	0	0	0	0	17782	17782
Рк.ш 320	18143,42	18143,42	0	0	0	0	0	0	0	0	18143,4	18143,4
Рк.ш 330	18167,63	18167,63	0	0	0	0	0	0	0	0	18167,6	18167,6
Рк.ш 340	18058,35	18058,35	18058,4	0	0	0	0	0	0	0	0	18058,4
Рк.ш 350	18077,54	18077,54	0	0	0	0	0	0	0	0	18077,5	18077,5
Рк.ш 360	17860,07	17860,07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17860,1
Рк.ш 370	17818,13	17818,13	17818,1	0	0	0	0	0	0	0	0	17818,1
Рк.ш 380	17791,62	17791,62	17791,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 390	0	17735,44	17735,4	0	17735,43648	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17609,7	17609,7
Рк.ш 410	17386,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17386,4	17386,4
Рк.ш 420	16996,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16996,9	16996,9
Рк.ш 430	16439,35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16439,3	16439,3
Рк.ш 440	15728,16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15728,2	15728,2
Рк.ш 450	14958,24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14958,2	14958,2
Рк.ш 460	14302,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14302,3	14302,3
Рк.ш 470	13981,43	13981,43	0	0	0	0	0	0	0	0	13981,4	13981,4
Рк.ш 480	14171,99	14171,99	0	0	0	0	0	0	0	0	14172	14172
Рк.ш 490	14886,78	14886,78	0	0	0	0	0	0	0	0	14886,8	14886,8
Рк.ш 500	15934,47	15934,47	0	0	0	0	0	0	0	0	15934,5	15934,5
Рк.ш 510	16986,42	16986,42	0	0	0	0	0	0	0	0	16986,4	16986,4
Рк.ш 520	17535,57	17535,57	0	0	0	0	0	0	0	0	17535,6	17535,6
Рк.ш 530	16545,45	16545,45	0	0	0	0	0	0	0	0	16545,5	16545,5
Рк.ш 540	12720,69	12720,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12720,7
Рк.ш 550	7799,452	7799,452	7799,45	0	0	0	0	0	0	0	0	7799,45
Рк.ш 560	7353,864	7353,864	7353,86	0	0	0	0	0	0	0	0	7353,86
Рк.ш 570	10222,69	10222,69	10222,7	0	0	0	0	0	0	0	0	10222,7
Рк.ш 580	12366,01	12366,01	12366	0	0	0	0	0	0	0	0	12366

Рк.ш 590	13357,64	13357,64	13357,6	0	0	0	0	0	0	0	0	13357,6
Рк.ш 600	13616,18	13616,18	13616,2	0	0	0	0	0	0	0	0	13616,2
Рк.ш 610	13670,08	13670,08	13670,1	0	0	0	0	0	0	0	0	13670,1
Рк.ш 620	13892,2	13892,2	13892,2	0	0	0	0	0	0	0	0	13892,2
Рк.ш 630	14424,87	14424,87	14424,9	0	0	0	0	0	0	0	0	14424,9
Рк.ш 640	15209,32	15209,32	15209,3	0	0	0	0	0	0	0	0	15209,3
Рк.ш 650	16093,01	16093,01	0	0	0	0	0	0	0	0	16093	16093
Рк.ш 660	16907,63	16907,63	0	0	0	0	0	0	0	0	16907,6	16907,6
Рк.ш 670	17560,57	17560,57	0	0	0	0	0	0	0	0	17560,6	17560,6
Рк.ш 680	18016,39	18016,39	0	0	0	0	0	0	0	0	18016,4	18016,4
Рк.ш 690	18290,74	18290,74	0	0	0	0	0	0	0	0	18290,7	18290,7
Рк.ш 700	18245,2	18245,2	0	0	0	0	0	0	0	0	18245,2	18245,2
Рк.ш 710	18090,77	18090,77	0	0	0	0	0	0	0	0	18090,8	18090,8
ΣРк.ш i	18089,88	18089,88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18089,9

Таблица Г5 - Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

Рк.ш i	Значения Рк.ш i, Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рк.ш 0	10516,29544	10516,29544	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10516,29544
Рк.ш 10	10391,95313	10391,95313	10391,95313	0	0	0	0	0	0	0	0	10391,95313
Рк.ш 20	9991,867391	9991,867391	9991,867391	0	0	0	0	0	0	0	0	9991,867391
Рк.ш 30	9357,305411	9357,305411	9357,305411	0	0	0	0	0	0	0	0	9357,305411
Рк.ш 40	8606,031983	8606,031983	8606,031983	0	0	0	0	0	0	0	0	8606,031983
Рк.ш 50	7866,734951	7866,734951	7866,734951	0	0	0	0	0	0	0	0	7866,734951
Рк.ш 60	7285,313464	7285,313464	7285,313464	0	0	0	0	0	0	0	0	7285,313464
Рк.ш 70	6979,735654	6979,735654	6979,735654	0	0	0	0	0	0	0	0	6979,735654
Рк.ш 80	6984,335793	6984,335793	0	0	0	0	0	0	0	0	6984,335793	6984,335793
Рк.ш 90	7234,626403	7234,626403	0	0	0	0	0	0	0	0	7234,626403	7234,626403
Рк.ш 100	7616,370318	7616,370318	0	0	0	0	0	0	0	0	7616,370318	7616,370318
Рк.ш 110	8005,069638	8005,069638	0	0	0	0	0	0	0	0	8005,069638	8005,069638
Рк.ш 120	8333,587315	8333,587315	0	0	0	0	0	0	0	0	8333,587315	8333,587315
Рк.ш 130	8571,645528	8571,645528	0	0	0	0	0	0	0	0	8571,645528	8571,645528
Рк.ш 140	8721,764146	8721,764146	0	0	0	0	0	0	0	0	8721,764146	8721,764146
Рк.ш 150	8800,160888	8800,160888	0	0	0	0	0	0	0	0	8800,160888	8800,160888
Рк.ш 160	8831,959855	8831,959855	0	0	0	0	0	0	0	0	8831,959855	8831,959855
Рк.ш 170	8843,174556	8843,174556	0	0	0	0	0	0	0	0	8843,174556	8843,174556
Рк.ш 180	8848,031587	8848,031587	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8848,031587
Рк.ш 190	8852,336977	8852,336977	8852,336977	0	0	0	0	0	0	0	0	8852,336977
Рк.ш 200	8850,101655	8850,101655	8850,101655	0	0	0	0	0	0	0	0	8850,101655
Рк.ш 210	8824,657873	8824,657873	8824,657873	0	0	0	0	0	0	0	0	8824,657873
Рк.ш 220	8752,053374	8752,053374	8752,053374	0	0	0	0	0	0	0	0	8752,053374
Рк.ш 230	8604,349209	8604,349209	8604,349209	0	0	0	0	0	0	0	0	8604,349209
Рк.ш 240	8380,848109	8380,848109	8380,848109	0	0	0	0	0	0	0	0	8380,848109
Рк.ш 250	8067,942043	8067,942043	8067,942043	0	0	0	0	0	0	0	0	8067,942043
Рк.ш 260	7691,93879	7691,93879	7691,93879	0	0	0	0	0	0	0	0	7691,93879
Рк.ш 270	7315,706085	7315,706085	7315,706085	0	0	0	0	0	0	0	0	7315,706085
Рк.ш 280	7034,688016	7034,688016	7034,688016	0	0	0	0	0	0	0	0	7034,688016
Рк.ш 290	6945,866964	6945,866964	6945,866964	0	0	0	0	0	0	0	0	6945,866964
Рк.ш 300	7088,40222	7088,40222	0	0	0	0	0	0	0	0	7088,40222	7088,40222
Рк.ш 310	7393,689887	7393,689887	0	0	0	0	0	0	0	0	7393,689887	7393,689887
Рк.ш 320	7687,160429	7687,160429	0	0	0	0	0	0	0	0	7687,160429	7687,160429
Рк.ш 330	7599,88452	7599,88452	0	0	0	0	0	0	0	0	7599,88452	7599,88452
Рк.ш 340	6211,132218	6211,132218	6211,132218	0	0	0	0	0	0	0	0	6211,132218
Рк.ш 350	2423,391642	2423,391642	0	0	0	0	0	0	0	0	2423,391642	2423,391642
Рк.ш 360	2716,843293	2716,843293	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2716,843293
Рк.ш 370	3940,492537	3940,492537	3940,492537	0	0	0	0	0	0	0	0	3940,492537
Рк.ш 380	3301,660153	3301,660153	3301,660153	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 390	0	4371,475904	4371,475904	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Рк.ш 400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5530,064008	5530,064008
Рк.ш 410	6254,802508	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6254,802508	6254,802508
Рк.ш 420	6719,890307	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6719,890307	6719,890307
Рк.ш 430	7124,117066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7124,117066	7124,117066
Рк.ш 440	7564,397748	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7564,397748	7564,397748
Рк.ш 450	8042,803023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8042,803023	8042,803023
Рк.ш 460	8512,597774	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8512,597774	8512,597774

Рк.ш 470	8921,928029	8921,928029	0	0	0	0	0	0	0	0	8921,928029	8921,928029
Рк.ш 480	9237,542628	9237,542628	0	0	0	0	0	0	0	0	9237,542628	9237,542628
Рк.ш 490	9450,525284	9450,525284	0	0	0	0	0	0	0	0	9450,525284	9450,525284
Рк.ш 500	9572,046685	9572,046685	0	0	0	0	0	0	0	0	9572,046685	9572,046685
Рк.ш 510	9445,993156	9445,993156	0	0	0	0	0	0	0	0	9445,993156	9445,993156
Рк.ш 520	9258,993895	9258,993895	0	0	0	0	0	0	0	0	9258,993895	9258,993895
Рк.ш 530	9246,748766	9246,748766	0	0	0	0	0	0	0	0	9246,748766	9246,748766
Рк.ш 540	9018,432959	9018,432959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9018,432959
Рк.ш 550	8971,804601	8971,804601	8971,804601	0	0	0	0	0	0	0	0	8971,804601
Рк.ш 560	8941,176508	8941,176508	8941,176508	0	0	0	0	0	0	0	0	8941,176508
Рк.ш 570	8887,379956	8887,379956	8887,379956	0	0	0	0	0	0	0	0	8887,379956
Рк.ш 580	8787,020901	8787,020901	8787,020901	0	0	0	0	0	0	0	0	8787,020901
Рк.ш 590	8636,117424	8636,117424	8636,117424	0	0	0	0	0	0	0	0	8636,117424
Рк.ш 600	8393,687472	8393,687472	8393,687472	0	0	0	0	0	0	0	0	8393,687472
Рк.ш 610	8058,699297	8058,699297	8058,699297	0	0	0	0	0	0	0	0	8058,699297
Рк.ш 620	7660,508306	7660,508306	7660,508306	0	0	0	0	0	0	0	0	7660,508306
Рк.ш 630	7269,968246	7269,968246	7269,968246	0	0	0	0	0	0	0	0	7269,968246
Рк.ш 640	6998,988971	6998,988971	6998,988971	0	0	0	0	0	0	0	0	6998,988971
Рк.ш 650	6970,847378	6970,847378	0	0	0	0	0	0	0	0	6970,847378	6970,847378
Рк.ш 660	7256,994781	7256,994781	0	0	0	0	0	0	0	0	7256,994781	7256,994781
Рк.ш 670	7826,302469	7826,302469	0	0	0	0	0	0	0	0	7826,302469	7826,302469
Рк.ш 680	8560,580198	8560,580198	0	0	0	0	0	0	0	0	8560,580198	8560,580198
Рк.ш 690	9312,030651	9312,030651	0	0	0	0	0	0	0	0	9312,030651	9312,030651
Рк.ш 700	9947,856324	9947,856324	0	0	0	0	0	0	0	0	9947,856324	9947,856324
Рк.ш 710	10369,20387	10369,20387	0	0	0	0	0	0	0	0	10369,20387	10369,20387
ΣРк.ш i	10516,29544	10516,29544	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10516,29544

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Расчет основных деталей двигателя

Д.1 Расчет поршневой группы

Д.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{из} = P_{z0} * (r_i / \delta)^2 = 7,539 * (29,8/8)^2 = 104,6 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.1})$$

где

$$r_i = D/2 - (s + t + \Delta t) = 82/2 - (7 + 3,5 + 0,7) = 29,8 \text{ мм} . \quad (\text{Д.2})$$

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении x – x

$$\sigma_{сж} = P_{z0} / F_{x-x} = 0,0398 / 0,001366 = 29,1 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.3})$$

где:

$$P_{z0} = p_{z0} * F_{\Pi} = 7,539 * 52,81 * 10^{-4} = 0,0398 \text{ МН} ; \quad (\text{Д.4})$$

$$F_{x-x} = (\pi/4) * (d_k^2 * d_i^2) * -n_M' F' = \left[3,14/4 \right] * (73,6^2 - 60^2) - 4 * 15 \cdot 10^{-6} = 0,001366 \text{ м}^2 ; \quad (\text{Д.5})$$

$$d_k = D - 2 * (t + \Delta t) = 82 - 2 * (3,5 + 0,7) = 73,6 \text{ мм} \\ F' = (d_k - d_i) * d_M / 2 = (73,6 - 60) * 3 / 2 = 15 \text{ мм}^2 ; \quad (\text{Д.6})$$

Напряжение разрыва в сечении x - x:

- максимальная угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x.x.\max} = \pi * n_{x.x.\max} / 30 = 3,14 * 6000 / 30 = 628 \text{ рад/сж} ; \quad (\text{Д.7})$$

- масса головки поршня с кольцами, расположенными выше сечения x - x

$$m_{x.x.} = 0,5 * m_{\Pi} = 0,5 * 0,422 = 0,211 \text{ кг} ; \quad (\text{Д.8})$$

- максимальная разрывающая сила

$$P_j = m_{x.x.} * R * \omega_{x.x.\max}^2 * (1 + \lambda) = 0,211 * 0,0375 * 628^2 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = 0,00606 \text{ МН} ; \quad (\text{Д.9})$$

- напряжение разрыва

$$\sigma_p = P_j / F_{x-x} = 0,00606 / 0,001366 = 4,44 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.10})$$

Напряжения в верхней кольцевой перемычке:

- среза

$$\tau = 0,0314 p_{z0} D / h_{\Pi} = 0,0314 * 7,539 * 82 / 3,5 = 5,54 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.11})$$

- изгиба

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{z0} (D / h_{\Pi})^2 = 0,0045 * 7,539 * (82 / 3,5)^2 = 18,62 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.12})$$

- сложное

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{18,62^2 + 4 * 5,54^2} = 21,67 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.13})$$

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\max} / (h_{ю} * D) = 0,0019806 / (0,045 * 0,082) = 0,54 \text{ МПа} ; \quad (\text{Д.14})$$

$$q_2 = N_{\max} / (H * D) = 0,0019806 / (0,064 * 0,082) = 0,38 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.15})$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 82 - 0,57 = 81,43 \text{ мм}; \quad (\text{Д.16})$$

$$D_{\text{ю}} = D - \Delta_{\text{ю}} = 82 - 0,16 = 81,84 \text{ мм}, \quad (\text{Д.17})$$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

$$\Delta'_{\Gamma} = D * \left[+\alpha_{\text{ц}}(T_{\text{ц}} - T_0) \right] - D_{\Gamma} * \left[+\alpha_{\text{п}}(T_{\Gamma} - T_0) \right] = 82 [1 + 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] - 81,43 [1 + 22 \cdot 10^{-6} (593 - 293)] = 0,114 \text{ мм}; \quad (\text{Д.20})$$

$$\Delta'_{\text{ю}} = D * \left[+\alpha_{\text{ц}}(T_{\text{ц}} - T_0) \right] - D_{\text{ю}} * \left[+\alpha_{\text{п}}(T_{\text{ю}} - T_0) \right] = 82 [1 + 11 \cdot 10^{-6} (383 - 293)] - 81,84 [1 + 22 \cdot 10^{-6} (413 - 293)] = 0,025 \text{ мм}; \quad (\text{Д.21})$$

где $T_{\text{ц}} = 383 \text{ К}$, $T_{\Gamma} = 593 \text{ К}$, $T_{\text{ю}} = 413 \text{ К}$ приняты с учетом водяного охлаждения двигателя.

Д.1.2 Расчет поршневого кольца

Материал кольца - серый чугун, $E = 1,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{\text{ср}} = 0,152 * E * \frac{A_0 / t}{\left(\frac{D}{t} - 1 \right) * \left(\frac{D}{t} \right)} = 0,152 * 10^5 * \frac{10,5 / 3,5}{\left(2 / 2,5 \right) * \left(2 / 3,5 \right)} = 0,173 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.22})$$

где

$$A_0 = 3t = 3 * 3,5 = 10,5 \text{ мм}. \quad (\text{Д.23})$$

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} * \mu_{\kappa} \quad (Д.24)$$

Результаты расчета p , а также μ_{κ} для различных углов φ приведены в таблице Д.1

Таблица Д.1 – Результаты расчета

φ , град	0	30	60	90	120	150	180
μ_{κ}	1,05	1,05	1Д4	0,90	0,45	0,67	2,85
p , МПа	0,182	0,182	0,197	0,156	0,078	0,116	0,493

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии

$$\sigma_{из1} = 2,61 * p_{cp} * (D/t - 1)^2 = 2,61 * 0,173 * (82/3,5 - 1)^2 = 227 \text{ МПа.} \quad (Д.25)$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень

$$\sigma_{из2} = \frac{4E * (1 - 0,114 * A_0 / t)}{m * (D/t - 1,4) * (D/t)} = \frac{4 * 10^5 * (1 - 0,114 * 10,5 / 3,5)}{1,57 * (82 / 3,5 * 1,4) * (82 / 3,5)} = 325 \text{ МПа} \quad (Д.26)$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца

$$\Delta_{\kappa} = \Delta'_{\kappa} + \pi D * [\mu_{\kappa} (T_{\kappa} - T_0) - \alpha_{ц} * (T_{ц} - T_0)] = 0,08 + 3,14 * 82 [11 * 10^{-6} * (493 - 293) - 11 * 10^{-6} * (383 - 293)] = 0,392 \text{ мм,} \quad (Д.27)$$

где $\Delta'_{\kappa} = 0,08$ мм, $T_{ц} = 383$, $T_{\kappa} = 493$ и $T_0 = 293$ К.

Д.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

$$P_{Z_{\max}} = p_{Z_{\max}} * F_{\Pi} = 7,539 * 52,81 * 10^{-4} = 0,0398 \text{ МН}; \quad (\text{Д.28})$$

- инерционная

$$P_j = -m_{\Pi} * R * \omega_M^2 * (1 + \lambda) * 10^{-6} = -0,422 * 335^2 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = -0,00233 \text{ МН}, \quad (\text{Д.29})$$

где

$$\omega_M = \pi * n_M / 30 = 3,14 * 3200 / 30 = 335 \text{ рад/сж}; \quad (\text{Д.30})$$

- расчетная

$$P = P_{Z_{\max}} + k * P_j = 0,0398 - 0,82 * 0,00233 = 0,0379 \text{ МН}. \quad (\text{Д.31})$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки

$$q_u = P / (d_{\Pi} * l_u) = 0,0379 / (22 * 26 * 10^{-6}) = 66,3 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.32})$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_b = P / (d_{\Pi} * (l_{\Pi} - b)) = 0,0379 / (0,022 * (0,06 - 0,03)) = 57,4 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.33})$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\sigma_{из} = P * (l_{\Pi} + 2b - 1,5l_u) / (1,2(1 - \alpha^4) * d_{\Pi}^3) = 0,0379 * (0,06 + 2 * 0,03 - 1,5 * 0,03) / (1,2(1 - 0,03^4) * 0,022^3) = 10,5 \text{ МПа}$$

$$*0,026)/(1,2*(1 - 0,682^4)*0,022^3) = 351 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.34})$$

где

$$\alpha = d_B / d_{II} = 15/22 = 0,682. \quad (\text{Д.35})$$

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = 0,85 * P * (1 + \alpha + \alpha^2) / ((1 - \alpha^4)) * d_{II}^2 = 0,85 * 0,0379 * (1 + 0,682 + 0,682^2) / (1 - 0,682^4) * 0,022^2 = 182 \text{ МПа}. \quad (\text{Д.36})$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации

$$\Delta d_{n \max} = \frac{1,35 * P}{E * l_{II}} * \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 * \left[1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = \frac{1,35 * 0,0379}{2 * 10^5 * 0,6} * \left(\frac{1 + 0,682}{1 - 0,682} \right)^3 * \left[1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] * 1000 = 0,049 \text{ мм} \quad (\text{Д.37})$$

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца:

- в горизонтальной плоскости (точки 1, $\psi = 0^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] * \left[1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} - \frac{1}{1 - 0,682} \right] * \left[1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = 178 \text{ МПа} \quad ; \quad (\text{Д.38})$$

- в вертикальной плоскости (точки 3, $\psi = 90^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * \left[1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,174 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * \left[1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = -286 \text{ МПа} \quad . \quad (\text{Д.39})$$

Напряжения овализации на внутренней поверхности пальца:

- в горизонтальной плоскости (точки 2, $\psi = 0^\circ$)

$$\sigma_{i0^\circ} = -\frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{1}{1 - \alpha} \right] * \left[1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = -\frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{1}{1 - 0,682} \right] * \left[1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = -341 \text{ МПа} \quad ; \quad (\text{Д.40})$$

- в вертикальной плоскости (точки 4, $\psi = 90^\circ$)

$$\sigma_{i90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * \left[1 - (\alpha - 0,4)^3 \right] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * \left[1 - (0,682 - 0,4)^3 \right] = 268 \text{ МПа} \quad . \quad (\text{Д.41})$$

Д.2 Расчет шатунной группы

Д.2.1 Расчет поршневой головки шатуна

Материал шатуна — углеродистая сталь 45Г2; $E_{ш} = 2,2 * 10^5 \text{ МПа}$, $\alpha_{\Gamma} = 1 * 10^{-5} \text{ 1/К}$.

Материал втулки — бронза; $E_B = 1,15 * 10^5 \text{ МПа}$, $\alpha_B = 1,8 * 10^{-5} \text{ 1/К}$.

По формулам определяем:

- при изгибе:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = 0,833, \quad (Д.42)$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 3,97; \quad (Д.43)$$

- при растяжении-сжатии:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_m} = 0,5,$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 0,76.$$

Расчет сечения I-I:

- максимальное напряжение пульсирующего цикла

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{(n + m_{г.з.}) * \omega_{x.x.\max}^2 * R * (\lambda) * 10^{-6}}{2 * h_z * l_u} = \\ &= \frac{(4,422 + 0,032) * 628 * 0,0375 * (0,3125) * 10^{-6}}{2 * 0,004 * 0,027} = 40,8 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (Д.44)$$

где $m_{г.з.} = 0,06 * m_{II} = 0,06 * 0,528 = 0,032 \text{ кг}$ - масса части головки выше сечения I-I;

$$\omega_{x.x.\max} = \pi * n_{x.x.\max} / 30 = 3,14 * 6000 / 30 = 628 \text{ рад/сж};$$

- среднее напряжение и амплитуда напряжений:

$$\sigma_{m0} = \sigma_{a0} = \frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{40,8}{2} = 20,4 \text{ МПа}, \quad (Д.45)$$

$$\sigma_{ak0} = \frac{\sigma_{a0} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{20,4 * 1,272}{0,85 * 1} = 30,53 \text{ МПа}, \quad (Д.46)$$

где $k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272$ - эффективный коэффициент концентрации напряжений (головка не имеет резких переходов и

концентрация напряжений в основном зависит от качественной структуры материала); $\varepsilon_M = 0,85$ - масштабный коэффициент; $\varepsilon_{II} = 1$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\frac{\sigma_{ak0}}{\sigma_{m0}} = \frac{30,53}{20,4} = 1,496 \geq \beta_\sigma - \alpha_\sigma = 0,76$, то запас прочности в сечении I-I определяется по пределу усталости

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{ak0} + \alpha_\sigma * \sigma_{m0}} = \frac{210}{30,53 + 0,12 * 20,4} = 6,3 \quad (Д.47)$$

Напряжения от запрессованной втулки (суммарный натяг)

$$\Delta_\Sigma = \Delta + \Delta_t = 0,04 + 0,0211 = 0,0611 \text{ мм},$$

где: $\Delta = 0,04 \text{ мм}$ - натяг посадки бронзовой втулки;

$\Delta_t = d * (\alpha_B - \alpha_\Gamma) * \Delta T = 24 * (8 * 10^{-5} - 1 * 10^{-5}) * 110 = 0,0211 \text{ мм}$ - температурный натяг;

$\Delta T = 110 \text{ К}$ - средний подогрев головки и втулки.

Удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой

$$P = \frac{\Delta_\Sigma}{d * \left[\frac{\frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2} + \mu}{E_{III}} + \frac{\frac{d_n^2 + d^2}{d_n^2 - d^2} + \mu}{E_B} \right]} = \frac{0,0611}{24 * \left[\frac{\frac{2^2 + 24^2}{2^2 - 24^2} + 0,3}{2,2 * 10^5} + \frac{\frac{4^2 + 22^2}{4^2 - 22^2} + 0,3}{1,15 * 10^5} \right]} = 22,1 \text{ МПа} \quad (Д.48)$$

где $\mu = 0,3$ - коэффициент Пуассона.

Напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки

$$\sigma'_i = \frac{P * (d_2^2 + d^2)}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,1 * (32^2 + 24^2)}{32^2 - 24^2} = 78,93 \text{ МПа} \quad (Д.49)$$

Напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки

$$\sigma'_a = \frac{P * 2 * d^2}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,1 * 2 * 24^2}{32^2 - 24^2} = 56,83 \text{ МПа} \quad (Д.50)$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

- максимальная сила, растягивающая головку на режиме $n = n_N$

$$P_{jn} = -m_n * R * \omega^2 * (1 + \lambda) = -0,422 * 0,0375 * 586^2 * (1 + 0,3125) = 7132 \text{ Н} \quad (Д.51)$$

где $\omega = \pi * n_N / 30 = 3,14 * 5600 / 30 = 586 \text{ рад/сж}$.

- нормальная сила и изгибающий момент в сечении 0-0:

$$N_{j0} = -P_{jn} * (0,572 - 0,0008 * \varphi_{ш.з}) = -(-7132) * (0,572 - 0,0008 * 105) = 3480 \text{ Н}; \quad (Д.52)$$

$$\begin{aligned} M_{j0} &= -P_{jn} * r_{cp} * (0,00033 * \varphi_{ш.з} - 0,0297) = 7139 * 0,014 * (0,00033 * 105 - 0,0297) = \\ &= 0,494 \text{ Н*м}, \end{aligned} \quad (Д.53)$$

где $\varphi_{ш.з} = 105^\circ$ — угол заделки; $r_{cp} = (d_r + d) / 4 = (32 + 24) / 4 = 14 \text{ мм}$ - средний радиус головки;

- нормальная сила и изгибающий момент в расчетном сечении от растягивающей силы:

$$N_{j\varphi_{u.3}} = N_{j0} * \cos \varphi_{u.3} - 0,5 * P_{jn} * (\sin \varphi_{u.3} - \cos \varphi_{u.3}) = 3480 * \cos 105^\circ - 0,5 * (-7132) * (\sin 105^\circ - \cos 105^\circ) = 3467 \text{ Н}; \quad (\text{Д.54})$$

$$M_{j\varphi_{u.3}} = M_{j0} + N_{jn} * r_{cp} (1 - \cos \varphi_{u.3}) + 0,5 * P_{jn} * r_{cp} * (\sin \varphi_{u.3} - \cos \varphi_{u.3}) = 0,494 + 3480 * 0,014 * (1 - \cos 105^\circ) + 0,5 * (-7132) * 0,014 * (\sin 105^\circ - \cos 105^\circ) = 0,68 \text{ Н*м}. \quad (\text{Д.55})$$

Напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы

$$\sigma_{aj} = \left[2 * M_{j\varphi_{u.3}} * \frac{6 * r_{cp} + h_z}{h_z * (2 * r_{cp} + h_z)} + K * N_{j\varphi_{u.3}} \right] * \frac{10^{-6}}{l_u * h_z} = \left[2 * 0,68 * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 3467 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = 37,1 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.56})$$

где:

$$K = \frac{E_u * F_z}{E_u * F_z + E_B * F_B} = \frac{2,2 * 10^5 * 216}{2,2 * 10^5 * 216 + 1,15 * 10^5 * 54} = 0,884; \\ F_z = (r_z - d) * l_u = (2 - 24) * 27 = 216 \text{ мм}^2; \\ F_B = (r_B - d_n) * l_u = (4 - 22) * 27 = 54 \text{ мм}^2. \quad (\text{Д.57})$$

Суммарная сила, сжимающая головку

$$P_{сж} = (P_{z0} - P_0) * F_n - m_n * R * \omega^2 * (\cos \varphi + \lambda * \cos 2\varphi) = (6,7596 - 0,1) * 0,005281 * 10^6 - 0,422 * 0,0375 * 586^2 * (\cos 370^\circ + 0,3125 * \cos 740^\circ) = 28222 \text{ Н}. \quad (\text{Д.58})$$

Нормальная сила и изгибающий момент в расчетном сечении от сжимающей силы:

$$N_{сж\varphi_{и.з.}} = P_{сж} * \left[\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} + \left(\frac{\sin \varphi_{и.з.}}{2} - \frac{\varphi_{и.з.}}{\pi} * \sin \varphi_{и.з.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{и.з.} \right) \right] =$$

$$= 28222 * \left[0,0005 + 0,002 \right] = 70,56 H; \quad (Д.59)$$

$$M_{сж\varphi_{и.з.}} = P_{сж} * r_{cp} * \left[\frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} + \frac{N_{сж0}}{P_{сж}} * (-\cos \varphi_{и.з.}) - \left(\frac{\sin \varphi_{и.з.}}{2} - \frac{\varphi_{и.з.}}{\pi} * \sin \varphi_{и.з.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{и.з.} \right) \right] =$$

$$= 28222 * 0,014 * \left[0,0001 + 0,0005 - 1,2588 - 0,002 \right] = -0,5 H * м, \quad (Д.60)$$

где :

$$\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} = 0,0005 ;$$

$$\frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} = 0,0001 ;$$

$$\left(\frac{\sin \varphi_{и.з.}}{2} - \frac{\varphi_{и.з.}}{\pi} * \sin \varphi_{и.з.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{и.з.} \right) = 0,002 ;$$

$$f(\varphi_{и.з.}) = 1 - \cos \varphi_{и.з.} = 1,2588 ;$$

Напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы

$$\sigma_{асс} = \left[2 * M_{сж\varphi_{и.з.}} * \frac{6 * r_{cp} + h_2}{h_2 * (2 * r_{cp} + h_2)} + K * N_{сж\varphi_{и.з.}} \right] * \frac{10^{-6}}{l_{и} * h_2} =$$

$$\left[2 * (-0,5) * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 70,56 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = -5,79 МПа. \quad (5.61)$$

Максимальное и минимальное напряжения асимметричного цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma_{aj} = 56,83 + 37,1 = 93,9 МПа ; \quad (5.62)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_a + \sigma_{acc} = 56,83 - 5,79 = 51,04 \text{ МПа} \quad (5.63)$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{93,9 + 51,04}{2} = 72,47 \text{ МПа}; \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{93,9 - 51,04}{2} = 21,43 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{21,43 * 1,272}{0,85 * 0,9} = 35,63 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (5.64)$$

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 72,47 = 0,492 \leq (\beta_\sigma - \alpha_\sigma) / (-\beta_\sigma) = 3,97$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ak} + \sigma_m} = \frac{420}{35,63 + 72,47} = 3,88 \quad (5.65)$$

Д.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна

Максимальная сила инерции

$$\begin{aligned} P_{jp} &= -R * \omega_{x.x.\max}^2 * (n_n + m_{u.n.}) * (1 + \lambda) + (n_{u.k.} - m_{kp}) * 10^{-6} = -628^2 * 0,0375 * \\ &* (0,422 + 0,132) * (0,3125) + (0,396 - 0,132) * 10^{-6} = -0,0147 \text{ МН}, \end{aligned} \quad (5.66)$$

где $m_{kp} = 0,25 * m_{u.} = 0,25 * 0,528 = 0,132$ кг.

Момент сопротивления расчетного сечения

$$W_{из} = \frac{l_k * (0,5 * c_\delta - r_1)}{6} = \frac{0,022 * (0,5 * 0,06 - 0,026)}{6} = 0,587 * 10^{-7} \text{ м}^3, \quad (Д.67)$$

где $r_1 = 0,5 * \sqrt{t_{u.u} + 2 * t_B} = 0,5 * (48 + 2 * 2) = 26 \text{ мм}$ - внутренний радиус кривошипной головки шатуна.

Моменты инерции вкладыша и крышки:

$$\begin{aligned} J_B &= l_k * t_B^3 = 22 * 2^3 * 10^{-12} = 176 * 10^{-12} \text{ м}^4; \\ J &= l_k * (0,5 * c_{\bar{o}} - r_1)^3 * 10^{-12} = 22 * (0,5 * 60 - 26)^3 * 10^{-12} = 1408 * 10^{-12} \text{ м}^4; \end{aligned} \quad (\text{Д.68})$$

Напряжение изгиба крышки и вкладыша:

$$\begin{aligned} \sigma_{из} &= P_{ip} * \left[\frac{0,023 * c_{\bar{o}}}{(J_B + J) * W_{из}} + \frac{0,4}{F_z} \right] = 0,0147 * \left[\frac{0,023 * 0,06}{\left(1 + \frac{176 * 10^{-12}}{1408 * 10^{-12}} \right) * 0,587 * 10^{-7}} + \frac{0,4}{0,000132} \right] = \\ &= 352 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Д.69})$$

где

$$F_z = l_k * 0,5 * (c_{\bar{o}} - d_{u.u.}) = 22 * 0,5 * (60 - 48) * 10^{-6} = 0,000132 \text{ м}^2. \quad (\text{Д.70})$$

Д.2.3 Расчет стержня шатуна

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В - В:

$$\begin{aligned} F_{cp} &= h_{uu} * b_{uu} - (c_{uu} - a_{uu}) * (c_{uu} - 2 * t_{uu}) = 24 * 15 - (15 - 5) * \\ &* (24 - 2 * 4,5) = 210 \text{ мм}^2 = 210 * 10^{-6} \text{ м}^2; \\ J_x &= \frac{h_{uu}^3 * b_{uu} - (c_{uu} - a_{uu}) * (c_{uu} - 2 * t_{uu})^3}{12} = \frac{24^3 * 15 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 14468 \text{ мм}^4 = 144,7 * 10^{-10} \text{ м}^4; \\ J_y &= \frac{h_{uu} * b_{uu}^3 - (c_{uu} - a_{uu}) * (c_{uu} - 2 * t_{uu})^3}{12} = \frac{24 * 15^3 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 6408 \text{ мм}^4 = 641 * 10^{-11} \text{ м}^4. \end{aligned} \quad (\text{Д.71})$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы: в плоскости шатуна

$$\sigma_{\max .x} = K_x * P_{сж} / F_{cp} = 1,077 * 0,02626 / (210 * 10^{-6}) = 135 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.72})$$

где

$$K_x = 1 + \left(\frac{F_e / \pi^2 E_{ш}}{F_{cp}^2 / J_x} \right) = 1 + \left(\frac{800 / 3,14^2 *}{* 2,2 * 10^5} \right) * \left(\frac{120^2 *}{* 210 / 14468} \right) = 1,077 . \quad (\text{Д.73})$$

Плоскости, перпендикулярной плоскости качения шатуна

$$\sigma_{\max .y} = K_y * P_{сж} / F_{cp} = 1,0206 * 0,02626 / (210 * 10^{-6}) = 128 \text{ МПа} ,$$

где:

$$\begin{aligned} K_y &= 1 + \left(\frac{F_e / \pi^2 E_{ш}}{F_{cp}^2 / 4 * J_y} \right) = 1 + \left(\frac{800 / 3,14^2 * 2,2 * 10^5}{* 2,5^2 * 210 / 4 * 6408} \right) = 1,0206 ; \\ L_1 &= L_{ш} - (d_1) / 2 = 120 - (4 + 51) / 2 = 82,5 . \end{aligned} \quad (\text{Д.74})$$

Минимальное напряжение от растягивающей силы

$$\sigma_{\min} = P_p / F_{cp} = -0,00939 / (210 * 10^{-6}) = -44,7 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.75})$$

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} &= \left(\sigma_{\max .x} + \sigma_{\min} \right) / 2 = (35 - 44,7) / 2 = 45,2 \text{ МПа}; \\ \sigma_{my} &= \left(\sigma_{\max .y} + \sigma_{\min} \right) / 2 = (28 - 44,7) / 2 = 41,7 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ax} &= \left(\sigma_{\max .x} - \sigma_{\min} \right) / 2 = (35 + 44,7) / 2 = 89,9 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ay} &= \left(\sigma_{\max .y} - \sigma_{\min} \right) / 2 = (28 + 44,7) / 2 = 86,4 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Д.76})$$

$$\begin{aligned}\sigma_{akx} &= \frac{\sigma_{ax} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{89,9 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 102,3 \text{ МПа}; \\ \sigma_{aky} &= \frac{\sigma_{ay} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{86,4 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 98,3 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.77}$$

где:

$$k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272, \tag{Д.78}$$

$$\varepsilon_M = 0,86;$$

$\varepsilon_n = 1,3$ - определяется с учетом поверхностного упрочнения стержня шатуна обдувкой дробью.

Так как $\sigma_{akx} / \sigma_{mx} = 102,3 / 45,2 = 2,263 \geq \beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma} = 0,76$ и $\sigma_{aky} / \sigma_{my} = 98,3 / 41,7 = 2,36 \geq \beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma} = 0,76$, то запасы прочности в сечении В-В определяются по пределу усталости:

$$\begin{aligned}n_{\sigma x} &= \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{akx} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{mx}} = \frac{210}{102,3 + 0,12 * 45,2} = 1,95 \\ n_{\sigma y} &= \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{aky} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{my}} = \frac{210}{98,3 + 0,12 * 41,7} = 2,03\end{aligned}\tag{Д.79}$$

Д.2.4 Расчет шатунных болтов

Для легированной стали 40Х: предел прочности $\sigma_B = 980$ МПа; предел усталости при растяжении - сжатии $\sigma_{-1p} = 300$ МПа; предел текучести $\sigma_T = 800$ МПа; коэффициенты приведения цикла при изгибе $\alpha_{\sigma} = 0,17$.

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1p} / \sigma_T = 300 / 800 = 0,375, \tag{Д.80}$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = \frac{0,375 - 0,17}{1 - 0,375} = 0,328 \tag{Д.81}$$

Сила предварительной затяжки

$$P_{PP} = 2 * P_{jp} / i_{\sigma} = 2 * 0,0147 / 2 = 0,0147 \text{ МН.} \quad (\text{Д.82})$$

Суммарная сила, растягивающая болт

$$P_{\sigma} = P_{PP} + \chi * P_{jp} / i_{\sigma} = 0,0147 + 0,2 * 0,0147 / 2 = 0,0162 \text{ МН.} \quad (\text{Д.83})$$

где $\chi = 0,2$.

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= 4 * P_{\sigma} / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0162 / (\pi,14 * 0,0086^2) = 279 \text{ МПа;} \\ \sigma_{\min} &= 4 * P_{PP} / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0147 / (\pi,14 * 0,0086^2) = 253 \text{ МПа;} \end{aligned} \quad (\text{Д.84})$$

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 + 253}{2} = 266 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 - 253}{2} = 13 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{13 * 3,43}{0,99 * 0,82} = 35,63 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (\text{Д.85})$$

где $k_{\sigma} = 1 + q * (\alpha k_{\sigma} - 1) = 1 + 0,81 * (4 - 1) = 3,43$; $\alpha k_{\sigma} = 4,0$; $q = 0,81$ при $\sigma_B = 980$ МПа; $\varepsilon_M = 0,99$ при $d = 10$ мм; $\varepsilon_n = 0,82$ (грубое обтачивание).

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 266 = 0,134 \leq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,328$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести:

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ak} + \sigma_m} = \frac{800}{4,9 + 266} = 2,49 \quad (\text{Д.86})$$

Д.3 Расчет коленчатого вала

Определяем:

- пределы прочности $\sigma_B = 400$ МПа и текучести (условные) $\sigma_T = 300$ МПа и $\tau_T = 160$ МПа;

- пределы усталости (выносливости) при изгибе $\sigma_{-1} = 150$ МПа, растяжении-сжатии $\sigma_{-1p} = 120$ МПа и кручении $\tau_{-1} = 115$ МПа;

- коэффициенты приведения цикла при изгибе $\alpha_\sigma = 0,4$ и кручении $\alpha_\tau = 0,6$.

Напряжения при изгибе:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = \frac{150}{300} = 0,5 \quad ; \quad (\text{Д.87})$$

$$\frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} = \frac{0,5 - 0,4}{1 - 0,5} = 0,2. \quad (\text{Д.88})$$

Напряжения при кручении:

$$\beta_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_m} = 0,719 \quad ; \quad (\text{Д.89})$$

$$\frac{(\beta_\tau - \alpha_\tau)}{(1 - \beta_\tau)} = \frac{0,719 - 0,6}{1 - 0,719} = 0,42. \quad (\text{Д.90})$$

Д.3.1 Удельное давление на поверхности шеек

Шатунных шеек:

$$\begin{aligned}
k_{ШШСР} &= \frac{R_{ШШСР}}{d_{ШШ} * l'_{ШШ}} = \frac{9342 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 8,8 \text{ МПа}; \\
k_{ШШ \max} &= \frac{R_{ШШ \max}}{d_{ШШ} * l'_{ШШ}} = \frac{21360 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 20,2 \text{ МПа},
\end{aligned}
\tag{Д.91}$$

где $l'_{ШШ} \approx l_{ШШ} - 2 * r_{гал} = 28 - 2 * 3 = 22 \text{ мм}$; - рабочая ширина шатунного вкладыша;
 $r_{гал}$ - радиус галтели принят равным 3 мм.

Коренных шеек:

$$\begin{aligned}
k_{КШСР} &= \frac{R_{КШСР}}{d_{КШ} * l'_{КШ}} = \frac{1947 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 1,77 \text{ МПа}; \\
k_{КШ \max} &= \frac{R_{КШ \max}}{d_{КШ} * l'_{КШ}} = \frac{16459 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 14,9 \text{ МПа},
\end{aligned}
\tag{Д.92}$$

где $l'_{КШ} \approx l_{КШ} - 2 * r_{гал} = 28 - 2 * 3 = 22 \text{ мм}$; - рабочая ширина коренного вкладыша.

Д.3.2 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления кручению коренной шейки

$$W_{кш} = \frac{\pi}{16} * d_{кш}^3 = \frac{3,14 * 50^3 * 10^{-9}}{16} = 24,5 * 10^{-6} \text{ м}^3
\tag{Д.93}$$

Максимальное и минимальные касательные напряжения знакопеременного цикла для наиболее нагруженной 4-й коренной шейки, на которую воздействует крутящий момент, имеющий наибольший размах:

$$\begin{aligned}
\tau_{\max} &= \frac{M_{КШ \max}}{W_{кш}} = \frac{500 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = 20,4 \text{ МПа}; \\
\tau_{\min} &= \frac{M_{КШ \min}}{W_{кш}} = \frac{-201,6 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = -8,2 \text{ МПа}.
\end{aligned}
\tag{Д.94}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 - 8,2}{2} = 6,1 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 + 8,2}{2} = 14,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{ak} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{14,3 * 1,1}{0,72 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.95}$$

где $k_\sigma = 0,6 * [1 + q * (\alpha_{\kappa\sigma} - 1)] = 1,1$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\alpha_{\kappa\sigma} = 3,0$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$q = 0,4$ - коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,72$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\tau} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\tau_{ak} / \tau_m = 18,2 / 6,1 = 2,98 \geq \beta_\tau - \alpha_\tau = 0,42$, то запас прочности коренной шейки определяется по пределу усталости

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{18,2 + 0,6 * 6,1} = 5,2\tag{Д.96}$$

Д.3.3 Расчёт шатунной шейки

Момент сопротивления кручению шатунной шейки

$$W_{\text{шш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{шш}}^3 = \frac{3,14 * 48^3 * 10^{-9}}{16} = 21,7 * 10^{-6} \text{ м}^3.\tag{Д.97}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла :

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{\text{III} \max}}{W_{\text{III}}} = \frac{552 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = 25,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{\text{III} \min}}{W_{\text{III}}} = \frac{-148 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = -6,8 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{Д.98}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{25,4 - 6,8}{2} = 9,3 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{25,4 + 6,8}{2} = 16,1 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{16,1 * 1,1}{0,73 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.99}$$

где $k_\tau = 0,6 * \left[1 + q * (\alpha_{k\tau} - 1) \right] = 1,1$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\alpha_{k\sigma} = 3,0$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$q = 0,4$ - коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,73$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\tau} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\tau_{\text{ак}} / \tau_m = 16,1 / 9,3 = 1,73 \geq \left(\beta_\tau - \alpha_\tau \right) \left(- \beta_\tau \right) = 0,42$, то запас прочности в шатунной шейки определяется по пределу усталости

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{\text{ак}} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{16,1 + 0,6 * 9,3} = 5,3\tag{Д.100}$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения асимметричного цикла шатунной шейки:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{M_{\varphi_M \max}}{W_{\sigma_{III}}} = \frac{6,76 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 0,62 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{M_{\varphi_M \min}}{W_{\sigma_{III}}} = \frac{-244 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 22,5 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.101}$$

где $W_{\sigma_{III}} = 0,5 * W_{\sigma_{III}} = 0,5 * 21,7 * 10^{-6} = 10,85 * 10^{-6} \text{ м}^3$

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 - 22,5}{2} = -10,9 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 + 22,5}{2} = 11,6 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{11,6 * 1,8}{0,76 * 1,2} = 22,9 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{Д.102}$$

где $k_{\sigma} = 1 + q * (\alpha k_{\sigma} - 1) = 1 + 0,4 * (3 - 1) = 1,8$ - коэффициент концентрации напряжений

$\alpha k_{\sigma} = 3,0$;

$\varepsilon_{M\sigma} = 0,76$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\sigma} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности, определен при расчете коренной шейки.

Запас прочности шатунной шейки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ak} + \alpha_{\tau} * \sigma_m} = \frac{150}{22,9 + 0,4 * (-10,9)} = 8,09\tag{Д.103}$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шш}} = \frac{n_{\sigma} * n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{8,09 * 5,3}{\sqrt{8,09^2 + 5,3^2}} = 4,43. \quad (\text{Д.104})$$

Д.3.4 Расчёт щеки

Максимальный и минимальный моменты, скручивающие щёку:

$$\begin{aligned} M_{\text{к.щ. max}} &= T_{\text{max}} * 0,5 * (l_{\text{к.щ.}} + h) = 2378 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = 54,7 \text{ Н} * \text{м}; \\ M_{\text{к.щ. min}} &= T_{\text{min}} * 0,5 * (l_{\text{к.щ.}} + h) = -4081 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = -93,9 \text{ Н} * \text{м}; \end{aligned} \quad (\text{Д.105})$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{max}} &= \frac{M_{\text{к.щ. max}}}{W_{\text{щ}}} = \frac{54,7 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = 7,8 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{min}} &= \frac{M_{\text{к.щ. min}}}{W_{\text{щ}}} = \frac{-93,9 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = -13,4 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Д.106})$$

где $W_{\text{щ}} = \mu * b * h^2 = 0,285 * 76 * 18^2 * 10^{-9} = 6,99 * 10^{-6} \text{ м}^3$ - момент сопротивления щеки.

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{m}} &= \frac{\tau_{\text{max}} + \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{7,8 - 13,4}{2} = -2,8 \text{ МПа} \\ \tau_{\text{a}} &= \frac{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{7,8 + 13,4}{2} = 10,6 \text{ МПа} \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_{\text{a}} * k_{\tau}}{\varepsilon_{\text{M}\tau} * \varepsilon_{\text{n}\tau}} = \frac{10,6 * 0,7}{0,64 * 0,75} = 15,5 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (\text{Д.107})$$

где $k_\tau = 0,7$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,64$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{P\tau} = 0,75$ - коэффициент поверхностной чувствительности

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяем по пределу усталости

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{15,5 + 0,6 * (-2,8)} = 8,32 \quad (\text{Д.108})$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

$$P_{щ, \max} = \frac{K_{\max} + K_R}{2} = \frac{25617 - 15324}{2} = 5147 \text{ Н},$$

$$P_{щ, \min} = \frac{K_{\min} + K_R}{2} = \frac{-9386 - 15324}{2} = -12355 \text{ Н}, \quad (\text{Д.109})$$

$$M_{щ, \max} = 0,25 * (K_{\max} + K_R + 2 * (-P'_{ПП})) * l_{ку} = 0,25 * (25617 - 15324 + 2 * 8000) * 28 * 10^{-3} = 184 \text{ Нм}$$

$$M_{щ, \min} = 0,25 * (K_{\min} + K_R + 2 * (-P'_{ПП})) * l_{ку} = 0,25 * (-12355 - 15324 + 2 * 8000) * 28 * 10^{-3} = -81,8 \text{ Нм} \quad (\text{Д.110})$$

$$\sigma_{\Sigma \max} = \frac{M_{щ, \max}}{W_{щ}} + \frac{P_{щ, \max}}{F_{щ}} = \frac{184 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{5147 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = 47,5 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\Sigma \min} = \frac{M_{щ, \min}}{W_{щ}} + \frac{P_{щ, \min}}{F_{щ}} = \frac{-81,8 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{-12355 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = -25,9 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.111})$$

где $W_{щ} = \frac{b * h^2}{6} = \frac{76 * 18^2}{6} = 4,21 * 10^{-6} \text{ м}^3$,

$$F_{щ} = b * h = 78 * 18 * 10^{-6} = 1368 * 10^{-6} \text{ м}^2$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{47,5 - 25,9}{2} = 10,8 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{47,5 + 25,9}{2} = 36,7 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{36,7 * 1,16}{0,7 * 0,75} = 81,1 \text{ МПа.}\end{aligned}\tag{Д.112}$$

где $k_\sigma = 1 + q * (\alpha k_\sigma - 1) = 1 + 0,4 * (1,4 - 1) = 1,16$ - коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha k_\sigma = 1,4$$

$\varepsilon_{M\sigma} = 0,7$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\sigma} = 0,75$ - коэффициент поверхностной чувствительности, определен при расчете коренной шейки;

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 81,1 / 10,8 = 7,51 \geq \beta_\sigma - \alpha_\sigma \geq 0,2$, то запас прочности шейки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ak} + \alpha_\tau * \sigma_m} = \frac{150}{81,1 + 0,4 * 10,8} = 1,75\tag{Д.113}$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шт}} = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{1,75 * 8,32}{\sqrt{1,75^2 + 8,32^2}} = 1,71.\tag{Д.114}$$

Д.4 Расчёт механизма газораспределения двигателя

Д.4.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане

Площадь проходного сечения клапана при максимальном подъеме

$$F_{кл} = V_{н.ср} F_n / (i_{кл} \omega_{вн}) = 15,3 * 52,8 / (2 * 95) = 4,25 \text{ см}^2 \quad (\text{Д.115})$$

Диаметр горловины клапана

$$d_{зоп} = \sqrt{4F_{зоп} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 4,25 / 3,14} = 2,46 \text{ см} , \quad (\text{Д.116})$$

где $F_{зоп} = 1,12 F_{кл} = 1,12 \cdot 4,25 = 4,76 \text{ см}^2$.

Из условия возможного размещения клапанов в головке при верхнем их расположении принимаем $d_{гор} = 25 \text{ мм}$;

Максимальная высота подъема клапана при угле фаски клапана $\alpha=45^\circ$

$$h_{кл\max} = \sqrt{4,93d_{зоп}^2 + 4,44F_{кл}} / 2,22 - d_{зоп} = \sqrt{4,93 \cdot 25^2 + 4,44 \cdot 4,25} / 2,22 - 25 = 6,75 \text{ мм}. \quad (\text{Д.117})$$

Д.4.2 Определение перемещения клапана

Зазор между клапаном и толкателем принимаем $\Delta s=0,25 \text{ мм}$

Протяженность участка сбега

$$\Phi_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \cdot \omega'_{m0к}} = \frac{3,14159^2 \cdot 0,25}{2 \cdot 180 \cdot 0,02} = 0,342694 \text{ рад} \approx 19^\circ 38' , \quad (\text{Д.118})$$

где $\omega'_{m0к} = 0,02 \text{ мм/}^\circ$ - скорость клапана в конце сбега, принята в пределах, рекомендованных для безударных кулачков

Протяженность других участков ускорения клапана $\Phi_1 = 23^\circ 30' = 0,410152 \text{ рад}$, $\Phi_2 = 4^\circ = 0,069813 \text{ рад}$, $\Phi_3 = 37^\circ = 0,645771 \text{ рад}$ удовлетворяет рекомендуемым соотношениям:

$$1) \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \pi \varphi_{p0} / 180 \Rightarrow \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \pi \varphi_{p0} / 180 = 0 ;$$

где $\varphi_{p0} = (\varphi_{np} + 180^0 + \varphi_{3n}) / 4 = 64,5^0$

$$0,410152 + 0,069813 + 0,645771 - 3,14 \cdot 64,5 / 180 = 0$$

$$2) \Phi_2 = (0,1 \dots 0,25) \Phi_3 \Rightarrow \Phi_2 / \Phi_3 = 0,1 \dots 0,25 ;$$

$$0,069813 / 0,645771 = 0,108 ;$$

$$3) \Phi_2 + \Phi_3 = (1,5 \dots 3,0) \Phi_1 \Rightarrow (\Phi_2 + \Phi_3) / \Phi_1 = 1,5 \dots 3,0 ;$$

$$(0,069813 + 0,645771) / 0,410152 = 1,745 ;$$

Вспомогательные величины и коэффициенты закона движения клапана:

$$k_1 = 8Z \left(\frac{\Phi_2}{\pi} \right)^2 = 8 \cdot \frac{5}{8} \left(\frac{0,069813}{3,14159} \right)^2 = 0,002469 ; \quad (\text{Д.119})$$

$$k_2 = \frac{5+Z}{6} \Phi_3^2 = \frac{5+5/8}{6} \cdot 0,645771^2 = 0,390956 ;$$

$$k_3 = \frac{4+Z}{3} \Phi_3 = \frac{4+5/8}{3} \cdot 0,645771 = 1,130099 ;$$

$$K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \Phi_2 = 0,002469 + 0,390956 + 1,221730 \cdot 0,120099 = 0,472321 ; \quad (\text{Д.120})$$

$$K_2 = k_3 + 4Z \frac{\Phi_2}{\pi} = 1,130099 + 4 \cdot \frac{5}{8} \cdot \frac{0,069813}{3,14159} = 1,185654 ;$$

где $Z = 5/8$ - принято по рекомендациям для кулачка Курца ;

$$c_{11} = \frac{K_1 \omega''_{m0\kappa} + K_2 h_{m\max}}{2K_1 + K_2 \Phi_1} = \frac{0,472321 \cdot 1,145917 + 1,185654 \cdot 6,75}{2 \cdot 0,472321 + 1,185654 \cdot 0,410152} = 7,006912 ; \quad (\text{Д.121})$$

где $\omega''_{m0\kappa} = \omega'_{m0\kappa} \cdot 180 / \pi = 0,02 \cdot 180 / 3,14159 = 1,145917 ;$

$$c_{12} = (c_{11} - \omega''_{m0\kappa}) \frac{\Phi_1}{\pi} = (7,006912 - 1,145917) \frac{0,410152}{3,14159} = 0,765185 \quad (\text{Д.122})$$

$$c_{32} = (2c_{11} - \omega''_{m0k}) / K_2 = (2 \cdot 7,006912 - 1,145917) / 1,185654 = 10,853003$$

$$c_{21} = c_{32}k_3 = 10,853003 \cdot 1,130099 = 12,264968$$

$$c_{22} = c_{32}k_1 = 10,853003 \cdot 0,002469 = 0,026796$$

$$c_{31} = c_{32} \frac{1-Z}{6\Phi_3^2} = 10,853003 \frac{1-5/8}{6 \cdot 0,645771^2} = 1,626570$$

$$c_{33} = c_{32}k_2 = 10,853003 \cdot 0,390956 = 4,243047$$

Подъем (перемещение) клапана по углу поворота кулачка φ_k (распределительного вала φ_p):

$$h_0 = \Delta s \left(1 - \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \varphi_{k0} \right); \quad \varphi_{k0} = 0^0 - 19^0 38'; \quad (\text{Д.123})$$

$$h_0 = 0,25 \left(1 - \cos \frac{3,14159}{2 \cdot 0,342694} \varphi_{k0} \right) = 0,25 (1 - \cos 4,583666 \varphi_{k0});$$

$$h_1 = \Delta s + c_{11} \varphi_{k1} - c_{12} \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \varphi_{k1}; \quad \varphi_{k1} = 0^0 - 25^0;$$

$$h_1 = 0,25 + 7,0069124 \varphi_{k1} - 0,765185 \sin \frac{3,14159}{0,410152} \varphi_{k1};$$

при $\varphi_{k1} = \varphi_{k1k} = 23^0 30' = 0,410152$ рад

$$h_{1k} = 3,1238972 \text{ мм.};$$

$$h_2 = h_{1k} + c_{21} \varphi_{k2} + c_{22} \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \varphi_{k2}; \quad \varphi_{k2} = 0^0 - 8^0;$$

$$h_2 = 3,1238971 + 12,264968 \varphi_{k2} + 0,026796 \sin \frac{3,14159}{2 \cdot 0,069813} \varphi_{k2};$$

при $\varphi_{k2} = \varphi_{k2k} = 4^0 = 0,069813$ рад

$$h_{2k} = 4,006948768 \text{ мм.};$$

$$h_3 = h_{2k} + c_{31}(\Phi_3 - \varphi_{k3})^4 - c_{32}(\Phi_3 - \varphi_{k3})^2 + c_{33}; \quad \varphi_{k3} = 0^0 - 37^0;$$

$$h_3 = 4,0069487 + 1,626570 \cdot (0,645771 - \varphi_{k3})^4 - 10,853003 \cdot (0,645771 - \varphi_{k3})^2 + 4,243047 ;$$

при $\varphi_{k3} = \varphi_{k3k} = 37^0 = 0,645771$ рад

$$h_{3k} = 8,24995 = 8,25 \text{ мм} = h_{кл \text{ макс}} + \Delta s$$

Величины перемещений толкателя по участкам Φ_0 , Φ_1 и Φ_3 в таблицу Д.2

Таблица Д.2 - Перемещение клапана

φ_p°	Φ_i°	φ_k°	$h, \text{мм}$	φ_p°	Φ_i°	φ_k°	$h, \text{мм}$	
331°22'	$\Phi_0=19^{\circ}3$	0	0	62°30'	$\Phi_2=37^{\circ}$	30	8,088	
336°22'		5	0,02	72°30'		20	7,307	
34Г22'		10	0,076	82°30'		10	5,920	
346°22'		15	0,193	87°30'		5	5,023	
351		19°38'	0,25	90		2°30'	4,529	
351	$\Phi_1=23^{\circ}30$	0	0,25	90	2°30'	4,529		
356		5	0,387	92°30'	4	4,007		
360		9	0,637	92°30'	$\Phi_2=4^{\circ}$	2	4,007	
6		15	1,390	94°30'		0	3,571	
11		20	2,351	96°30'	$\Phi_1=23^{\circ}30'$	23,5	3.124	
14°30'	23,5	3,124	96°30'	23°30''		3.124		
14°30'	$\Phi_2=4^{\circ}$	0	3,124	100	$\Phi_1=23^{\circ}30'$	20	2,351	
16°30'		2	3,571	105		15	1,390	
18°30'		4	4,007	111		9	0,637	
18°30'	$\Phi_2=37^{\circ}$	0	4,007	115	$\Phi_1=23^{\circ}30'$	5	0,387	
23°30'		5	5,023	120		0	0,25	
28°30'		10	5,920	120		$\Phi_0=19^{\circ}38'$	19°38'	0,25
38°30'		20	7,307	124°38'			15	0,193
48°30'		30	8,088	129°38'			10	0,076
55°30'	37	8,250	134°38'	5	0,02			
0		37	8,250	139°38'	0	0		

Д.4.3 Определение время-сечения клапана газодинамическим методом

Диаграмма подъема толкателя является диаграммой подъема клапана. Один градус поворота распределительного вала равен

$$1_p^0 = 1/(6 \cdot n_p) = 1/(6 \cdot 2900) = 5,747126 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (\text{Д.124})$$

Значит время-сечение клапана

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt = F_{\text{кл}}(t_2) - F_{\text{кл}}(t_1) = 1,5651 - 0,0215 = 1,5436 \text{ мм}^2 \cdot \text{с} \quad (\text{Д.125})$$

где $F_{\text{кл}}(t_1)$ - время-сечение в момент начала такта впуска, а $F_{\text{кл}}(t_2)$ - в конце.

Средняя площадь проходного сечения клапана

$$F_{\text{кл ср}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot 1_p^0} = \frac{1,5436}{(90 - 0) \cdot 5,747126 \cdot 10^{-5}} = 298,4294 \text{ мм}^2 = 2,984294 \text{ см}^2 \quad (\text{Д.126})$$

Средняя скорость потока смеси в седле клапана

$$\omega'_{\text{сн}} = V_{\text{н ср}} F_n / (i_{\text{кл}} \cdot F_{\text{кл ср}}) = 15,3 \cdot 52,8 / (2 \cdot 2,984294) = 133,359 \text{ м/с} \quad (\text{Д.127})$$

Полное время-сечение клапана

$$\begin{aligned} \int_{t_{\text{нр}}}^{t_x} F_{\text{кл}} dt &= \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \cdot (\pi \cos \alpha \cdot d_{\text{зоп}}) \cdot 1/(6 \cdot n_p) = \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \cdot (3,14159 \cdot \cos 45^\circ \cdot 25) \cdot 1/(6 \cdot 2900) = \\ &= 4,340744 \cdot 10^{-3} \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \text{ мм}^2 \cdot \text{с}, \end{aligned} \quad (\text{Д.128})$$

где $t_{\text{нр}}$ - момент начала открытия впускного клапана, t_x - текущее значение времени подъема клапана.

Д.4.4 Расчет пружины клапана

Материал пружин – пружинная сталь, $\tau_1=350$ МПа, $\sigma_B=1500$ МПа.

Максимальная сила упругости пружин

$$P_{np\max} = KM_{кл} a \omega_{kr}^2 = 1,4 * 145 * 11,5 * 293^2 * 10^{-6} = 201H, \quad (Д.129)$$

где $K=1,4$ - коэффициент запаса;

$M_{кл} = m_{кл} + m_{np}/3 + m_T = 95 + 60/3 + 30 = 145$ Г – суммарная масса клапанного механизма.

Минимальная сила упругости пружины

$$P_{np\min} = KM_{кл} (r_0 - r_2) \omega_k^2 = 1,4 * 145 * (15 - 8,5) * 298^2 * 10^{-6} = 113H \quad (Д.130)$$

Жесткость пружины

$$c = KM_{кл} \omega_{kr}^2 = 1,4 * 145 * 293^2 * 10^{-6} = 17,43кН / м. \quad (Д.131)$$

Деформация пружины:

-предварительная

$$f_{\min} = r_0 - r_2 = 15 - 8,5 = 6,5мм \quad (Д.132)$$

- полная

$$f_{\max} = f_{\min} + h_{кл.\max} = 6,5 + 6,75 = 13,25мм \quad (Д.133)$$

Размеры пружин (приняты по конструктивным соображениям):

- диаметр проволоки $\delta_{np} = 3$ мм;

- средний диаметр пружины $D_{np} = 22$ мм;

Число рабочих витков пружины

$$i_p = \frac{G \cdot \delta_{np}^4 \cdot f_{\max}}{8P_{np\max} \cdot D_{np}^3} = \frac{8,3 \cdot 0,3^4 \cdot 1,325}{8 \cdot 201 \cdot 10^{-6} \cdot 2,2^3} = 5,202, \quad (Д.134)$$

где $G = 8,3$ - модуль упругости второго рода, МН/см².

Максимальные и минимальные напряжения в пружине:

$$\tau_{\max} = k' \frac{8P_{np\max} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 1,21 \frac{8 \cdot 201 \cdot 22 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 3^3 \cdot 10^{-9}} = 504 \text{ МПа}; \quad (Д.135)$$

$$\tau_{\min} = k' \frac{8P_{np\min} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 1,21 \frac{8 \cdot 113 \cdot 22 \cdot 10^{-9}}{3,14 \cdot 3^3 \cdot 10^{-9}} = 284 \text{ МПа},$$

где $k' = 1,21$ определен при $D_{np}/\delta_{np} = 22/3 = 7,33$.

Средние напряжения и амплитуды напряжений:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{504 + 284}{2} = 394 \text{ МПа}; \quad (Д.136)$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{504 - 284}{2} = 110 \text{ МПа}.$$

Так как концентрация напряжений на витках пружины учитывается коэффициентом k' , а $k_\tau/\varepsilon_m \varepsilon_n \approx 1$, то

$$\tau_{ak} = \tau_a \frac{k_\tau}{\varepsilon_m \varepsilon_n} = 110 \cdot 1 = 110 \text{ МПа}. \quad (Д.137)$$

Запас прочности пружины

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_{\tau} \tau_m} = \frac{350}{110 + 0,2 \cdot 394} = 1,85, \quad (Д.138)$$

где $\alpha_{\tau} = 0,2$.

Расчет пружин на резонанс:

$$n_c = \frac{2,17 \cdot 10^7 \delta_{np}}{i_p D_{np}^2} = \frac{2,17 \cdot 10^7 \cdot 3}{5,202 \cdot 22^2} = 29569; \quad (Д.139)$$

$$\frac{n_c}{n_p} = \frac{29569}{2800} = 10,2 \neq 1,2,3\dots$$

Д.4.5 Расчет распределительного вала

Максимальная сила от выпускного клапана, действующая на кулачек

$$P_{T \max} = \left[P_{np \min} + \frac{\pi d_s^2}{4} (p_z - p'_z) \right] + M_T \omega_k^2 (r_1 - r_0) =$$

$$= \left[113 + \frac{3,14 \cdot 0,026^2}{4} (4,445 - 0,1) \cdot 10^6 \right] + 145 \cdot 293^2 (57,2 - 15) \cdot 10^{-6} = 821 \quad \text{Н, (Д.140)}$$

где:

$$d_s = \left(\frac{1}{1,0 \div 1,2} \right) d_{en} = \frac{30}{1,15} = 26 \quad \text{мм — диаметр тарелки выпускного клапана;}$$

$$d_{en} = 0,06 \div 1,12 \cdot d_{zop} = 1,12 \cdot 25 = 30 \quad \text{мм — диаметр тарелки впускного клапана;}$$

$$M_T = m_{ки} + m_{np} / 3 + m_T = 95 + 60 / 3 + 30 = 145 \text{ з}$$

Стрела прогиба распределительного вала

$$y = 0,8 \frac{P_{T \max} a^2 b^2}{El} = 0,8 \frac{821 \cdot 27^2 \cdot 62^2}{2,2 \cdot 10^5 \cdot 89 \cdot 2^4} = 0,000401 \text{ мм,} \quad (\text{Д.141})$$

где $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали;

$l = a + b = 27 + 62 = 89$ мм - длина пролета распределительного вала, принята по конструктивным соображениям;

$d_p = 22$ мм - наружный диаметр вала.

Напряжение смятия

$$\sigma_{см} = 0,418 \sqrt{\frac{P_{T \max} E}{b_k r_1}} = 0,418 \sqrt{\frac{0,000821 \cdot 2,2 \cdot 10^5}{0,014 \cdot 0,0572}} = 475 \text{ МПа,} \quad (\text{Д.142})$$

где $b_k = 14$ мм - ширина кулачка.

Допускаемые напряжения смятия $\sigma_{см} = 400 \div 1200$ МПа.

Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A4			16.БР.ЭМСУ.002.00.000.ПЗ	Пояснительная записка	18	
A1			16.БР.ЭМСУ.002.00.000.СБ	Сборочный чертеж	2	
				<u>Сборочные единицы</u>		
		5	16.БР.ЭМСУ.002.05.000	Насос водяной	1	
		9	16.БР.ЭМСУ.002.09.000	Форсунка бензиновая	4	
		18	16.БР.ЭМСУ.002.18.000	Масляный насос	1	
		11	16.БР.ЭМСУ.002.11.000	Фильтр масляный	1	
		6	16.БР.ЭМСУ.002.06.000	Поршень в сборе	4	
		7	16.БР.ЭМСУ.002.07.000	Шатун	4	
		20	16.БР.ЭМСУ.002.20.000	Клапан выпускной	8	
		21	16.БР.ЭМСУ.002.21.000	Клапан впускной	8	
		22	16.БР.ЭМСУ.002.22.000	Распределительный вал выпускной	1	
		23	16.БР.ЭМСУ.002.23.000	Распределительный вал впускной	1	
		4	16.БР.ЭМСУ.002.04.000	Маховик	1	
				<u>Детали</u>		
		3	16.БР.ЭМСУ.002.03.000	Шкив привода генератора	1	
		8	16.БР.ЭМСУ.002.08.000	Коленчатый вал	1	
				16.БР.ЭМСУ.002.00.000.СБ		
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		
Разраб.		Давыдов Д.Ю.			Литера	Лист
Проверил		Смоленский В.В.				Листов
						1
						2
Н. контр.		Егоров А.Г.			ТГУ ЭМСБ-1201	
Утвердил		Павлов Д.А.				
					Бензиновый двигатель с непосредственным впрыском топлива для автомобиля ВАЗ	

Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
		2	16.БР.ЭМСУ.002.02.000	Коллектор выпускной	1	
		12	16.БР.ЭМСУ.002.12.000	Маслоприемник	1	
		13	16.БР.ЭМСУ.002.13.000	Прокладка блока		
				цилиндров	1	
		16	16.БР.ЭМСУ.002.16.000	Прокладка блока		
				картера	1	
		1	16.БР.ЭМСУ.002.01.000	Блок цилиндров	1	
		10	16.БР.ЭМСУ.002.10.000	Поддон	1	
		15	16.БР.ЭМСУ.002.15.000	Головка блока	1	
		17	16.БР.ЭМСУ.002.17.000	Кожух ГРМ	1	
		14	16.БР.ЭМСУ.002.14.000	Коллектор впускной	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
				Шпилька М10		
				ГОСТ 22038-76	10	
				Болт М6-8g		
				ГОСТ 5916-70	14	
				Подшипник 205		
				ГОСТ 8338-57*	4	
				Шайба 6		
				ГОСТ 6402-70	18	
				Гайка М8-8g		
				ГОСТ 5915-70	16	
				Шпилька М6-8gX40		
				ГОСТ 22038-76	5	
				Шпилька М8-8gX65		
				ГОСТ 22038-76	4	
				16.БР.ЭМСУ.002.00.000		Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		2

Форм. зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
			<u>Документация</u>		
A4		16.БР.ЭМСУ.002.00.000.ПЗ	Пояснительная записка	1	
A1		16.БР.ЭМСУ.002.00.000.СБ	Сборочный чертеж	1	
			<u>Сборочные единицы</u>		
	1	16.БР.ЭМСУ.002.01.000	Сопло	4	
	2	16.БР.ЭМСУ.002.02.000	Игла форсунки	4	
	3	16.БР.ЭМСУ.002.03.000	Тефлоновое уплотнение	4	
	4	16.БР.ЭМСУ.002.04.000	Направляющая	4	
	5	16.БР.ЭМСУ.002.05.000	Уплотнение	4	
	6	16.БР.ЭМСУ.002.06.000	Корпус форсунки	4	
	7	16.БР.ЭМСУ.002.07.000	Магнитный якорь	4	
	8	16.БР.ЭМСУ.002.08.000	Соленоид (обмотка возбуждения)	4	
	9	16.БР.ЭМСУ.002.09.000	Пружина	4	
	10	16.БР.ЭМСУ.002.10.000	Верхний корпус	4	
	11	16.БР.ЭМСУ.002.11.000	Стержень	4	
	12	16.БР.ЭМСУ.002.12.000	Фильтр сетчатый	4	
	13	16.БР.ЭМСУ.002.13.000	Уплотнительное кольцо	4	
16.БР.ЭМСУ.002.00.000					
Изм.	Лист	И документа	Подпись	Дата	16.БР.ЭМСУ.002.00.000 Форсунка
Разраб.	Лист	Литера	Лист	Листов	
Проверил		ТГУ ЭМСБ-1201	1	2	
Н. контр.					
Утвердил					